



**SKRIPSI-TK 141581**

**PENGUKURAN KESETIMBANGAN UAP-CAIR SISTEM  
BINER ISOTHERMAL 2-BUTANOL + DIETIL  
KARBONAT DAN TERT-BUTANOL + DIETIL  
KARBONAT PADA TEMPERATUR 303.15 – 323.15 K**

**Oleh :  
ANDIKA DWIMASPUTRA  
NRP. 2313 100 003**

**NAOMI HURAYAH ADEN  
NRP. 2313 100 034**

**Dosen Pembimbing :  
Prof. Dr. Ir. Gede Wibawa, M.Eng  
NIP. 19630122 198701 1 001  
Rizky Tetrisyanda, S.T., M.T.  
NIP. 19910110 201504 2 002**

**DEPARTEMEN TEKNIK KIMA  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA 2017**

(halaman ini sengaja dikosongkan)



**FINAL PROJECT – TK141581**

**ISOTHERMAL VAPOR-LIQUID EQUILIBRIUM  
MEASUREMENT FOR BINARY SYSTEMS OF 2-  
BUTANOL + DIETHYL CARBONATE AND TERT-  
BUTANOL + DIETHYL CARBONATE AT  
TEMPERATURES RANGE OF 303.15 – 323.15 K**

**Written By :**

**ANDIKA DWIMASPUTRA**

**NRP 2313 100 003**

**NAOMI HURAYAH ADEN**

**NRP 2313 100 034**

**Advisor :**

**Prof. Dr. Ir. Gede Wibawa, M.Eng**

**NIP. 1963 01 22 1987 01 1001**

**Rizky Tetrisyanda, S.T., M.T.**

**NIP. 19910110 201504 2 002**

**DEPARTEMENT OF CHEMICAL ENGINEERING  
FACULTY OF TECHNOLOGY INDUSTRY  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA 2017**

(halaman ini sengaja dikosongkan)

## LEMBAR PENGESAHAN

### PENGUKURAN KESETIMBANGAN UAP-CAIR SISTEM BINER ISOTHERMAL 2-BUTANOL + DIETIL KARBONAT DAN TERT-BUTANOL + DIETIL KARBONAT PADA TEMPERATUR 303.15 – 323.15 K

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar  
Sarjana Teknik pada Program Studi S-1 Departemen Teknik  
Kimia Institut Teknologi Sepuluh Nopember



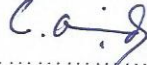
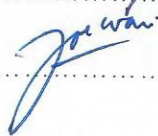
Oleh :

Andika Dwimasputra  
Naomi Hurayah Aden

NRP. 2313100003  
NRP. 2313100034

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Prof. Dr. Ir. Gede Wibawa, M.Eng  
(Pembimbing)
2. Rizky Tetrisyanda, S.T., M.T  
(Pembimbing)
3. Prof. Dr. Ir. Kuswandi, DEA  
(Penguji I)
4. Juwari, S.T., M.Eng, Ph.D  
(Penguji II)

  
.....  
  
.....  
  
.....  
  
.....



**PENGUKURAN KESETIMBANGAN UAP-CAIR SISTEM  
BINER ISOTHERMAL 2-BUTANOL + DIETIL  
KARBONAT DAN TERT-BUTANOL + DIETIL  
KARBONAT PADA TEMPERATUR 303.15-323.15 K**

**Nama** : Andika Dwimasputra (2313100003)  
Naomi Hurayah Aden (2313100034)  
**Departemen** : Teknik Kimia ITS  
**Pembimbing** : Prof. Dr. Ir. Gede Wibawa, M.Eng  
Rizky Tetrisyanda, S.T, M.T

**ABSTRAK**

Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh data kesetimbangan uap-cair(VLE) isothermal sistem biner 2-butanol + dietil karbonat dan tert-butanol + dietil karbonat pada suhu 303.15-323.15 K yang akurat dan mengkorelasikan data eksperimen dengan model Wilson, NRTL, dan UNIQUAC. Peralatan eksperimen yang digunakan adalah ebulliometer sederhana yang telah dikembangkan di Laboratorium Termodinamika Teknik Kimia ITS. Eksperimen diawali dengan mengukur tekanan uap murni masing-masing komponen menghasilkan deviasi kurang dari 0.8% dibanding data literatur. Kemudian dilakukan pengukuran tekanan uap campuran biner dengan rentang fraksi mol 0-1. Dari hasil eksperimen, diketahui semua sistem yang diteliti menunjukkan deviasi positif terhadap hukum Raoult dan perilaku azeotrop ditemukan untuk sistem 2-butanol + DEC pada semua rentang temperatur eksperimen. Data eksperimen untuk sistem tert-butanol (1) + DEC (2) yang dikorelasikan dengan model Wilson, UNIQUAC, NRTL memberikan AAD sebesar 1.3% untuk semua model, dan untuk sistem 2-butanol (1) + DEC (2) memberikan AAD 1.5% untuk model Wilson dan UNIQUAC serta 1.4% untuk model NRTL.

**Kata kunci:** Kesetimbangan Uap-Cair; 2-butanol; tert-butanol; Dietil Karbonat; Wilson; NRTL; UNIQUAC.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

**ISOTHERMAL VAPOR-LIQUID EQUILIBRIUM  
MEASUREMENT FOR BINARY SYSTEMS OF 2-  
BUTANOL + DIETHYL CARBONATE AND TERT-  
BUTANOL + DIETHYL CARBONATE AT  
TEMPERATURES RANGE OF 303.15-323.15 K**

**Name** : Andika Dwimasputra (2313100003)  
Naomi Hurayah Aden (2313100034)  
**Department** : Chemical Engineering ITS  
**Advisor** : Prof. Dr. Ir. Gede Wibawa, M.Eng  
Rizky Tetrisyanda S.T, M.T

**ABSTRACT**

*The objective of this research was to measure isothermal vapor-liquid equilibrium (VLE) data for binary systems of 2-butanol + diethyl carbonate and tert-butanol + diethyl carbonate in temperature range of 303.15-323.15 K accurately and correlating the experimental data with Wilson, NRTL, and UNIQUAC models. The experimental apparatus used was the simple ebulliometer developed in Thermodynamics Laboratory of Chemical Engineering ITS. The experiment was started by measuring the vapor pressure of each pure component giving Average Absolute Deviation (AAD) of less than 0.8% compared to the literature data. Furthermore, the measurement of vapor pressure mixture of binary with the mole fraction range of 0-1. From the experimental results, it was found that all the systems studied show a positive deviation from Raoult's law and the azeotropic behavior was found for 2-butanol + DEC system. The experimental data for the tert-butanol (1) + DEC (2) system were correlated with the Wilson, UNIQUAC, NRTL models giving 1.3% AAD for all models, and for 2-butanol (1) + DEC (2) systems giving 1.5 % AAD for Wilson and UNIQUAC models and 1.4% for the NRTL model.*

**Key Word:** Vapor-Liquid Equilibrium; 2-butanol; Tert-butanol; Diethyl Carbonate; Wilson; NRTL; UNIQUAC.



(halaman sengaja dikosongkan)

## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kami haturkan kepada Tuhan Yang Maha Esa karena berkat rahmat dan karunia-Nya kami dapat menyelesaikan Tugas Akhir (Skripsi) yang berjudul:

**Pengukuran Kesetimbangan Uap-Cair Sistem Biner Isothermal 2-butanol + Dietil Karbonat dan tert-butanol + Dietil Karbonat Pada Temperatur 303.15 – 323.15 K.**

Penulisan ini adalah ditujukan untuk memenuhi salah satu syarat dalam menyelesaikan program Strata-1 (S1) Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknologi Industri (FTI), Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS).

Kami berterima kasih atas dukungan dan doa dari berbagai pihak yang turut mendukung kelancaran pengerjaan tugas akhir kami. Pada kesempatan ini kami ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Gede Wibawa, M. Eng. selaku Dosen Pembimbing tugas akhir dan Kepala Laboratorium Termodinamika.
2. Ibu Rizky Tetrisyanda, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing.
3. Bapak dan Ibu Dosen Pengajar serta seluruh Karyawan Departemen Teknik Kimia
4. Orang tua dan saudara-saudara yang selalu mendukung dan mendoakan kami.
5. Teman – teman di Laboratorium Termodinamika Teknik Kimia.
6. Teman-teman angkatan K53.
7. Semua pihak yang telah membantu selama proses studi dan penyelesaian skripsi yang tidak bisa disebutkan satu per satu.

Semoga Allah SWT selalu memberkati dan memberi rahmat atas kebaikan yang telah diberikan. Penulis juga mengharapkan kritik dan saran yang membangun agar lebih baik di penelitian mendatang.

Pada akhirnya, kami berharap semoga tugas akhir ini dapat berkontribusi untuk ilmu pengetahuan khususnya bagi para Pembaca.

Surabaya, 3 Juli 2017

Penyusun

## DAFTAR ISI

### LEMBAR PENGESAHAN

ABSTRAK .....	i
ABSTRACT .....	ii
KATA PENGANTAR.....	iii
DAFTAR ISI.....	iv
DAFTAR GAMBAR.....	vi
DAFTAR TABEL .....	vii

### BAB I PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang .....	1
I.2 Perumusan Masalah.....	4
I.3 Tujuan Penelitian .....	5
I.4 Manfaat Penelitian.....	5

### BAB II TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Tinjauan Penelitian .....	6
II.2 Karakteristik Bahan.....	6
II.2.1 <i>Diethyl Carbonate</i> (DEC).....	6
II.2.2 2-Butanol .....	7
II.2.3 Tert-butanol .....	8
II.3 Keseimbangan Uap Cair (VLE).....	9
II.4 Persamaan-Persamaan Koefisien	
Aktifitas .....	12
II.4.1 Persamaan Wilson .....	12
II.4.2 Persamaan NRTL .....	14
II.4.3 Persamaan UNIQUAC .....	16
II.5 Metode GRG ( <i>Generalized</i>	
<i>Reduced</i> Gradient) Nonlinear .....	18

### BAB III METODOLOGI PENELITIAN

III.1 Deskripsi Penelitian .....	20
III.2 Peralatan Eksperimen.....	20
III.3 Bahan Eksperimen .....	21
III.4 Variabel Eksperimen.....	22
III.5 Prosedur Eksperimen .....	22
III.6 <i>Data Treatment</i> .....	22

III.7 Estimasi <i>Uncertainty</i> pada Eksperimen .....	24
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	
IV.1 Validasi Alat .....	26
IV.2 Data Eksperimen Pengukuran Tekanan Uap.....	32
IV.2.1 Sistem Biner Tert-Butanol (1)	
+ DEC (2).....	32
IV.2.2 Sistem Biner 2-butanol (1)	
+ DEC (2).....	34
IV.3 Korelasi Dengan Model Wilson,	
NRTL, UNIQUAC .....	36
IV.3.1 Sistem Biner Tert-Butanol (1)	
+ DEC (2).....	36
IV.3.2 Sistem Biner 2-butanol (1)	
+ DEC (2).....	40
IV.4 Deviasi Terhadap Hukum Raoult .....	45
<b>BAB V KESIMPULAN</b> .....	49
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	50
<b>DAFTAR NOTASI</b> .....	54
<b>LAMPIRAN</b>	

## DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Sifat-sifat Beberapa Jenis Bahan Bakar .....	3
Tabel 2.1	Properti <i>Diethyl Carbonate</i> .....	7
Tabel 2.2	Properti 2-Butanol.....	8
Tabel 2.3	Properti Tert-Butanol .....	8
Tabel 4.1	Parameter Wagner 2-Butanol dan Tert- Butanol .....	27
Tabel 4.2	Parameter Antoine DEC .....	27
Tabel 4.3	Tekanan Uap 2-Butanol.....	28
Tabel 4.4	Tekanan Uap Tert-Butanol .....	29
Tabel 4.5	Tekanan Uap DEC .....	30
Tabel 4.6	Data Eksperimen Tekanan Uap Sistem Tert-Butanol (1) + DEC (2).....	33
Tabel 4.7	Data Eksperimen Tekanan Uap Sistem 2- Butanol (1) + DEC (2).....	35
Tabel 4.8	<i>Initial Value</i> Masing-masing Parameter .....	37
Tabel 4.9	Parameter dan AAD Hasil Korelasi .....	38
Tabel 4.10	Initial Value Masing-masing Parameter .....	42
Tabel 4.11	Parameter dan AAD Hasil Korelasi .....	42
Tabel 4.12	Hasil Perhitungan Titik Azeotrop Sistem Biner 2-Butanol (1) + DEC (2) .....	45

(halaman ini sengaja dikosongkan)

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1	Skema Alat Ebuliometer (Oktavian <i>et al.</i> , 2013)(Wibawa <i>et al.</i> , 2015).....	21
Gambar 3.2	Diagram alir perhitungan parameter dengan persamaan Wilson, NRTL, dan UNIQUAC .....	24
Gambar 4.1	Hubungan Tekanan Uap dan Suhu pada Validasi Alat menggunakan 2-Butanol Murni .....	28
Gambar 4.2	Hubungan Tekanan Uap dan Suhu pada Validasi Alat menggunakan Tert-Butanol Murni.....	30
Gambar 4.3	Hubungan Tekanan Uap dan Suhu pada Validasi Alat menggunakan DEC Murni.....	31
Gambar 4.4	Grafik $P-x_1$ untuk Sistem Biner Tert-Butanol (1) + DEC (2) pada Berbagai Suhu .....	39
Gambar 4.5	Grafik $P-x_1, y_1$ untuk Sistem Biner Tert-Butanol (1) + DEC (2) pada Suhu 313.15 K.....	40
Gambar 4.6	Grafik $P-x_1$ untuk Sistem Biner 2-Butanol (1) + DEC (2) pada Berbagai Suhu .....	43
Gambar 4.7	Grafik $P-x_1, y_1$ untuk Sistem Biner 2-Butanol (1) + DEC (2) pada Suhu 308.15 K.....	44



(halaman ini sengaja dikosongkan)

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **I.1 Latar Belakang**

Kebutuhan energi nasional tumbuh sekitar 7-8% per tahun yang dipicu dengan pertumbuhan ekonomi sekitar 4-6% tahun dan pertumbuhan penduduk 1,2% per tahun, sedangkan tercatat baru 6% sumber energi di Indonesia dipenuhi dari Energi Baru Terbarukan (EBT), dan 94% dari total penyediaannya berasal dari energi fosil. Padahal, keberadaan energi berbasis sumberdaya fosil telah menipis dan semakin langka (Direktorat Sumber Daya Energi, Mineral dan Pertambangan, 2012).

Badan Perencanaan Pembangunan Nasional melalui Direktorat Sumber Daya Energi, Mineral dan Pertambangan mengeluarkan Kebijakan Energi Nasional (KEN) yang menargetkan energi nasional pada tahun 2050 akan didominasi oleh EBT sebesar 40%. Sedangkan untuk minyak bumi dan gas bumi akan berada di kisaran 15-20%. Maka, diperlukan upaya untuk dapat mencapai target tersebut, yaitu dengan melakukan pengembangan terhadap penggunaan EBT dalam pemenuhan kebutuhan energi masyarakat, salah satunya dengan alkohol. Alkohol merupakan bahan bakar yang dapat diperbaharui yang mana salah satu jenisnya, yakni etanol, telah banyak digunakan sebagai bahan bakar maupun campuran bensin pada kendaraan bermotor. Lebih dari 95% bensin di Amerika mengandung etanol, yang biasa disebut dengan E10 (10% etanol, 90% bensin) untuk mengoksidasi bahan bakar dan mengurangi polusi udara (*Alternative Fuels Data Center, U.S. Department of Energy*, 2015).

Kualitas bahan bakar yang baik untuk mesin bensin memiliki spesifikasi: mudah menguap; titik nyala antara 10-15° C; berat jenis antara 0,6-0,78; nilai kalor 9500-10.000 kkal/kg;

*anti knock* (Yusron, 2005). Unjuk kerja mesin bensin dipengaruhi oleh tingginya angka okтана bensin sebagai bahan bakar, besarnya perbandingan kompresi, tingkat homogenitas campuran bahan bakar dengan udara, tekanan udara dalam bahan bakar, waktu pengapian, kondisi mesin, pembuangan hasil sisa pembakaran (Yusron, 2005).

Penggunaan etanol sebagai bahan bakar menimbulkan masalah yang diantaranya kenaikan tekanan uap. Tekanan uap yang tinggi dapat mengakibatkan terjadinya *vapor lock*. (Mariadi dan Kurniawan, 2014). *Vapor lock* merupakan kondisi dimana proses *start up* mesin gagal terjadi, karena bahan bakar liquid telah berubah menjadi gas saat pengiriman bahan bakar sehingga mengganggu pengoperasian pompa bahan bakar yang menyebabkan hilangnya tekanan umpan ke karburator. Jika dibandingkan dengan bensin, *heating value* etanol lebih rendah (Semar dan Yuliarita, 2011).

Telah dilakukan sejumlah penelitian, seperti Wallner *et al.*, 2009, Semar dan Yuliarita, 2011 untuk meneliti 2-butanol dan tert-butanol sebagai bahan bakar maupun bahan aditif alternatif pengganti etanol. Karena rantai hidrokarbonnya lebih panjang, maka pada umumnya 2-butanol dan tert-butanol bersifat non-polar, tidak larut dalam air sehingga tidak menyebabkan terbentuknya layer pada bahan bakar.

Berdasarkan Tabel 1.1 berikut ini dapat terlihat bahwa baik 2-butanol maupun tert- butanol memiliki *vapor pressure* yang lebih rendah, dan memiliki *heating value* lebih tinggi dibanding *vapor pressure* etanol, sehingga kedua jenis butanol ini lebih mirip bensin daripada etanol (Moxey *et al.*, 2015). Bahan bakar butanol sudah pernah didemonstrasikan di mobil berbahan bakar bensin tanpa ubahan apapun (Varol *et al.*, 2014). Pembakaran hasil campuran butanol menghasilkan suhu gas buang tinggi dikarenakan nilai kalornya yang tinggi dan panas penguapan yang lebih rendah, yang mengakibatkan suhu pembakaran tinggi. Oleh karena itu, 2-butanol dan tert-butanol dapat dipertimbangkan untuk dijadikan pengganti etanol.

**Tabel 1.1** Sifat-sifat Beberapa Jenis Bahan Bakar (Semar dan Yuliarita, 2011)

Karakteristik	Etanol	2-Butanol	Tert-Butanol
Heating Value	21.1-21.7 MJ/L	26.9-27 MJ/L	
RON	111	108	90.9
Reid Vapor Pressure (psi)	31	0.354	0.787

Dari Tabel 1.1 diatas juga dapat dilihat bahwa nilai oktan dari butanol lebih rendah daripada etanol, sehingga dibutuhkan aditif untuk dapat menaikkan nilai oktan dari 2-butanol dan tert-butanol. Dietil karbonat (DEC) merupakan aditif dengan kandungan oksigen yang memiliki potensial tinggi untuk mengurangi emisi dari pembakaran bahan bakar bensin maupun diesel. Diketahui bahwa dengan penambahan 5% berat DEC pada bahan bakar diesel dapat mengurangi emisi hingga 50% (Dunn *et al.*, 2002). DEC memiliki kandungan energi yang lebih tinggi, tekanan uap yang lebih rendah sebesar 0.193 psi, dan distribusi yang lebih baik di dalam bensin dibandingkan di dalam air. Selain itu, DEC merupakan bahan yang ramah lingkungan karena tidak beracun, cepat terurai oleh bakteri dan *bioaccumulation* rendah (Pacheco dan Marshall, 1997).

Dalam mengatasi kekurangan yang ada pada alkohol sebagai campuran pada bensin yang berupa rendahnya nilai oktan, maka DEC yang memiliki nilai oktan lebih tinggi yakni 111, dapat digunakan sebagai zat tambahan (co-aditif) dalam campuran bensin-alkohol. Selain itu, DEC dapat menjadi *oxygenated compound* pada bahan bakar untuk mengurangi polusi yang dihasilkan oleh mesin karena memiliki kandungan oksigen yang tinggi (40.6%- berat) (Dunn *et al.*, 2002). Dan dibandingkan dengan *oxygenated compound* lain yang umum digunakan seperti MTBE (*methyl-tert-buthyl-eter*), DEC dapat terdekomposisi secara perlahan menjadi CO<sub>2</sub> dan etanol yang

tidak memberikan dampak yang berarti pada lingkungan (Eyring *et al.*, 2000).

Tekanan gas yang diakibatkan oleh proses pembakaran normal akan merata (tanpa fluktuasi tekanan) dalam ruang bakar, pembakaran dimulai sebelum akhir langkah kompresi dan diakhiri sesaat setelah melewati titik mati atas. Setiap pembakaran sempurna pasti akan menghasilkan karbondioksida dan air, reaksi ini hanya dapat berlangsung jika campuran udara-bahan bakar sesuai dengan kebutuhan atau campuran stoikiometris dan cukup waktu untuk pembakaran campuran udara-bahan bakar (Wijaya, 2012). Analisis termodinamika yang lebih rinci dari proses pembakaran diperlukan untuk menjelaskan hasil untuk semua campuran dan, secara khusus, perbedaan emisi untuk masing-masing bahan bakar alkohol yang berbeda (Varol *et al.*, 2014). Analisis dari kedua komposisi fase uap dan cair diperlukan karena adanya perbedaan antara komposisi fase cair di kesetimbangan dan komposisi *feed* (Oktavian *et al.*, 2013). Sehingga data tekanan uap yang akurat dari kesetimbangan uap-cair (*Vapor-Liquid Equilibrium*) sangat penting dalam mendesain campuran bahan bakar dengan tekanan uap yang spesifik sebagai properti yang penting pada bahan bakar. Dan penelitian untuk sistem biner alkohol (2-butanol / tert-butanol) + dietil karbonat pada suhu 303.15-323.15 K belum pernah dilakukan.

## **I.2 Perumusan Masalah**

Berdasarkan uraian di atas, dijelaskan bahwa bahan bakar butanol sudah pernah didemonstrasikan di mobil berbahan bakar bensin tanpa ubahan apapun, pembakaran hasil campuran butanol menghasilkan suhu gas buang tinggi dikarenakan nilai kalornya yang tinggi dan panas penguapan yang lebih rendah, yang mengakibatkan suhu pembakaran tinggi. Dan dalam mengatasi kekurangan yang ada pada alkohol sebagai campuran pada bensin yang berupa rendahnya nilai oktan, maka DEC yang memiliki nilai oktan lebih tinggi dapat digunakan sebagai zat

tambahan (co-aditif) dalam campuran bensin-alkohol, dan dapat menjadi *oxygenated compound* pada bahan bakar untuk mengurangi polusi yang dihasilkan oleh mesin karena memiliki kandungan oksigen yang tinggi. Analisis dari kedua komposisi fase uap-cair diperlukan karena adanya perbedaan antara komposisi fase cair di kesetimbangan dan komposisi *feed*, sehingga dalam mendesain campuran bahan bakar diperlukan data tekanan uap campuran yang akurat dari kesetimbangan uap-cair antar komponen-komponen yang akan dijadikan campuran dengan bahan bakar. Untuk data kesetimbangan uap-cair isothermal 2-butanol + dietil karbonat dan tert-butanol + dietil karbonat pada suhu 303.15-323.15 K belum pernah dilakukan. Oleh karena itu, penelitian ini diharapkan mampu melengkapi hasil yang belum diperoleh oleh peneliti tentang kesetimbangan uap-cair yang telah dilakukan sebelumnya, yakni dengan menghasilkan data kesetimbangan uap-cair isothermal sistem biner 2-butanol + dietil karbonat dan tert-butanol + dietil karbonat pada suhu 303.15-323.15 K untuk basis dalam mendesain campuran bahan bakar bensin dengan DEC dan alkohol.

### **I.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan data kesetimbangan uap-cair sistem biner 2-butanol + DEC dan tert-butanol + DEC secara isothermal pada suhu 303.15-323.15 K yang akurat dan mengkorelasikan data eksperimen dengan model Wilson, NRTL, dan UNIQUAC.

### **I.4 Manfaat Penelitian**

Data kesetimbangan uap-cair sistem biner 2-butanol + DEC dan tert-butanol + DEC secara isothermal pada suhu 303.15-323.15 K yang diperoleh dalam penelitian ini dapat digunakan untuk mendesain campuran bahan bakar bensin dengan DEC dan alkohol (2- butanol dan tert-butanol).

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **II.1 Tinjauan Penelitian**

Penelitian ini dilakukan dengan meninjau beberapa penelitian tentang kesetimbangan uap-cair yang telah dilakukan sebelumnya, antara lain:

1. Rodriguez *et al.* (2003) meneliti tentang kesetimbangan uap cair untuk sistem biner dietil karbonat dengan lima alkohol (metanol, etanol, 1-propanol, 1-butanol, 1-pentanol) pada tekanan 101.3 kPa dan suhu 351.73 K – 396.02 K.
2. Oktavian *et al.* (2013) meneliti tentang tekanan uap sistem etanol + isooktana dan 1-butanol + isooktana menggunakan Ebulliometer yang baru.
3. Ho *et al.* (2015) meneliti tentang kesetimbangan uap cair campuran biner mengandung *diethyl carbonate*, *phenyl acetate*, *diphenyl carbonate* atau *ethyl acetate* pada suhu 373.2 K – 453.2 K.
4. Novera dan Salam (2015) meneliti tentang kesetimbangan uap cair campuran biner etanol + dietil karbonat dan 2-propanol + dietil karbonat pada 303.15 – 323.15 K.
5. Jeremy *et al.* (2016) meneliti tentang kesetimbangan uap cair campuran biner 2-propanon + 2-butanol pada suhu 333.15 K dan 353.15 K serta 2-propanon + asam propanoat pada suhu 333.15 K, 353.15 K dan 373.15 K.

#### **II.2 Karakteristik Bahan**

##### **II.2.1 *Diethyl Carbonate* (DEC)**

*Diethyl Carbonate* (DEC) telah dikenal sebagai bahan kimia yang ramah lingkungan karena DEC dapat terurai dengan lambat menjadi karbon dioksida dan etanol dimana keduanya tidak mempunyai efek pada saat dibuang ke lingkungan (Crandall *et al.*,



1987). Kandungan oksigen yang tinggi dalam DEC menjadikan DEC berpotensi tinggi sebagai bahan aditif penambah nilai oksigen dalam bahan. Terdapat beberapa metode secara sintesis untuk memproduksi DEC, seperti proses phosgene (Muskat dan Strain, 1941), pertukaran ester (Urano *et al.*, 1993), aktivasi dari karbon dioksida (Tomishige *et al.*, 1999), reaksi dari etanol dengan urea dengan katalis organotin (Ryu, 1999) dan oksidatif carbonylation dari etanol (Dunn *et al.*, 2002) (Roh *et al.*, 2002) (Zhang *et al.*, 2005).

**Tabel 2.1** Properti *Diethyl Carbonate*<sup>[a,b]</sup>

Nama Lain	Carbonic Ether, Ethyl Carbonate, Eufin
Rumus Kimia	OC(OCH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>
Berat Molekul	118.13 g/mole
Lower Heating Value	74.3 MBtu/gal
Vapor Pressure @20 °C <sup>[c]</sup>	1.11 kPa
Normal Boiling Point	126 °C
Melting Point	-43 °C
Research Octane Number (RON) Gasoline Blending at 10 vol%	111
Motor Octane Number (MON) Gasoline Blending at 10 vol%	96

<sup>a</sup>(Pacheco dan Marshall, 1997); <sup>b</sup>(Short, 1983); <sup>c</sup>(Perry dan Green Don, 1984)

## II.2.2 2-Butanol

2-butanol merupakan senyawa alkohol sekunder dengan ciri-ciri fisik sebagai larutan bening dan tidak berwarna. Sec-butyl alcohol diproduksi secara komersial dari butena menggunakan *indirect hydration* dengan asam sulfat (Kirk-Othmer, 1984). 2-butanol dapat diproduksi dengan *selective hydrogenolysis* dari 1,4 Anhydroerythritol, molybdenum oxide, *Modified Rhodium* dan *supported silica* (Arai, *et al.*, 2016). Penggunaan 2-butanol

mencakup *intermediate* produk, pelumas dan bahan tambahan pelumas dan sebagai pelarut (NCBI, 2005).

**Tabel 2.2** Properti 2-Butanol<sup>[a]</sup>

Nama Lain	2-Butyl Alcohol, butan-2-ol
Rumus Kimia	$\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_2\text{CH}_3$
Berat Molekul	74.12 g/mole
Densitas	0.8063 g/cm <sup>3</sup> at 20 °C
Heat of Combustion <sup>[b]</sup>	15109 BTU/lb
Vapor Pressure @25 °C	18.3 mmHg
Normal Boiling Point	99.5 °C
Melting Point	-114 °C
Research Octane Number (RON) [b]	108
Motor Octane Number (MON) <sup>[b]</sup>	92.5

<sup>a</sup>(NCBI, 2005); <sup>b</sup>(Xu dan Vogel, 2012);

### II.2.3 Tert-butanol

Tert-butanol merupakan senyawa alkohol sekunder dengan ciri -ciri fisik sebagai larutan bening dan tidak berwarna. Tert-butanol diproduksi melalui hidrasi 1-butene dan isobutylene, selain itu tert-butanol merupakan hasil samping dari oksidasi isobutana untuk proses produksi dari propylene oxide (Kirk-Othmer, 1991). Penggunaan tert-butanol antara lain sebagai aditif bahan bakar, *intermediate* produk dan bahan kimia untuk laboratorium (NCBI, 2005).

**Tabel 2.3** Properti tert-butanol<sup>[a]</sup>

Nama Lain	Tert-butyl alcohol, 2-Methyl-2-propanol
Rumus Kimia	$(\text{CH}_3)_3\text{COH}$
Berat Molekul	74.12 g/mole
Heat of Combustion <sup>[b]</sup>	14936 BTU/lb
Vapor Pressure @25 °C	40.7 mmHg

Normal Boiling Point	82.3 °C
Melting Point	25.81 °C
Research Octane Number 15% (RON) <sup>[b]</sup>	90.9
Motor Octane Number 15% (MON) <sup>[b]</sup>	83.1

<sup>a</sup>(NCBI, 2005); <sup>b</sup>(Xu dan Vogel, 2012);

### II.3 Keketimbangan Uap Cair (VLE)

Apabila suatu campuran zat cair berada dalam keketimbangan dengan campuran uap pada temperatur dan tekanan yang sama, maka dapat dikatakan bahwa sistem campuran zat cair tersebut berada pada keketimbangan Uap Cair. Suatu sistem dikatakan setimbang secara termodinamika jika sistem tersebut tidak mengalami kecenderungan ke arah perubahan pada skala makroskopis.

Uap berasal dari fase liquida yang menunjukkan kecenderungan untuk berubah menjadi uap. Fase uap juga memiliki kecenderungan menjadi fase liquida dengan cara kondensasi. Kecenderungan untuk berubah dapat diukur dengan kuantitas  $f$  yang disebut fugasitas. Pada keadaan setimbang properti-properti yang teramati tidak berubah terhadap waktu, sehingga properti-properti intensif atau potensial termodinamikanya (suhu, tekanan, potensial kimia) sama dalam suatu sistem. Keseragaman tersebut berpengaruh pada tidak adanya transfer panas, transfer massa, dan kerja dari dalam maupun ke luar sistem.

Untuk setiap komponen dalam campuran, kondisi keketimbangan dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$f_i^L = f_i^V \quad (2.1)$$

Untuk fase uap dengan fraksi mol  $y$ , hubungan antara fugasitas dengan temperatur, tekanan dan fraksi mol, koefisien fugasitas dapat di nyatakan dengan persamaan :

$$\hat{f}_i^V = y_i \hat{\phi}_i P \quad (2.2)$$

Fugasitas komponen  $i$  dalam fase cair terhubung dengan komposisi fase yang bersangkutan melalui koefisien aktivitas  $\gamma_i$  yang dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$\hat{f}_i^L = x_i \gamma_i f_i^0 \quad (2.3)$$

Dengan harga  $f_i^0$  didapatkan dari persamaan

$$f_i^0 = P_i^{sat} \hat{\phi}_i^{sat} \exp\left(\frac{V_i^l(P - P_i^{sat})}{RT}\right) \quad (2.4)$$

Pada tekanan rendah, faktor exponensial (*pynting factor*) yang nilainya mendekati 1 dan  $\hat{\phi}_i$  dianggap 1 sehingga :

$$\hat{f}_i^L = \gamma_i x_i P_i^{sat} \quad (2.5)$$

Pada tekanan rendah fasa gas diasumsikan mengikuti kelakuan gas ideal maka :

$$\hat{\phi}_i = 1 \quad (2.6)$$

Maka Dari Persamaan (2.2) dan (2.5) didapatkan persamaan :

$$y_i P = P_i^{sat} \gamma_i x_i$$

(2.7)

Sedangkan koefisien aktivitas dinyatakan dengan persamaan :

$$\gamma_i = \frac{\hat{f}_i^L}{x_i f_i^o} \quad (2.8)$$

Pada Persamaan Gibbs Duhem dinyatakan bahwa di dalam suatu campuran, koefisien aktivitas tiap komponennya tidak bebas terhadap yang lain melainkan terhubung melalui Persamaan Diferensial. Persamaan Umum Gibbs Duhem :

$$\left[ \frac{\partial M}{\partial P} \right]_{T,x} dP + \left[ \frac{\partial M}{\partial T} \right]_{P,x} dT - \sum_i x_i d\bar{M}_i = 0 \quad (2.9)$$

Pada  $P$  dan  $T$  konstan, maka :

$$\sum_i x_i d\bar{M}_i = 0 \quad (2.10)$$

Jika  $\ln \gamma_i$  adalah properti parsial, maka Persamaan (2.10) menjadi:

$$\sum x_i d \ln \gamma_i = 0 \quad (2.11)$$

Maka diperoleh hubungan Persamaan Gibbs Duhem untuk sistem biner sebagai berikut :

$$x_1 \left[ \frac{\partial \ln \gamma_1}{\partial x_1} \right]_{T,P} = x_2 \left[ \frac{\partial \ln \gamma_2}{\partial x_2} \right]_{T,P} \quad (2.12)$$

Agar suatu data mudah diolah maka harganya relatif terhadap suatu keadaan ideal dengan eksresi properti yaitu perbedaan antara harga nyata dan harga idealnya, dimana :

$$M^E = M - M^{id} \quad (2.13)$$

$$nG^E = nG - nG^{id} \quad (2.14)$$

Penggunaan Persamaan Gibbs Duhem paling baik dilakukan melalui konsep kelebihan energi Gibbs (*excess* energi Gibbs), yaitu energi Gibbs teramati pada suatu campuran yang di atas atau lebih besar untuk larutan ideal pada temperatur, tekanan dan komposisi yang sama.

Total kelebihan energi Gibbs  $G^E$  untuk larutan biner, mengandung  $n_1$  mol komponen 1 dan  $n_2$  mol komponen 2 di definisikan dengan :

$$\frac{G^E}{RT} = x_1 \ln \gamma_1 + x_2 \ln \gamma_2 \quad (2.15)$$

Dalam sistem kesetimbangan uap-cair, ketika yang diketahui merupakan data fraksi komponen pada liquid dan suhu, sedangkan yang dihitung adalah tekanan, maka digunakan perhitungan BUBL P dengan asumsi  $\sum_i y_i = 1$  . Oleh karena itu Persamaan (2.7) menjadi:

$$P = \sum_i x_i \gamma_i P_i^{sat} \quad (2.16)$$

## II.4 Persamaan – Persamaan Koefisien Aktifitas

Model energi Gibbs seperti Wilson, NRTL (Non Random Two Liquid), UNIFAC (Universal Functional Activity Coefficient) dan UNIQUAC (Universal Quasi-Chemical) sering digunakan untuk korelasi VLE campuran non-ideal. Model ini membutuhkan parameter interaksi biner tiap pasangan antar molekulnya (*pair*).

### II.4.1 Persamaan Wilson

Persamaan Wilson dikemukakan oleh Wilson (1964). Persamaan Wilson mengacu pada konsep *local composition* yang merupakan dasar dari pengembangan teori pada termodinamika molekuler untuk *liquid-solution*. Pada *liquid-solution*, komposisi lokal berbeda dengan komposisi campuran secara keseluruhan,

merupakan perkiraan untuk menghitung *short-range* dan *nonrandom molecular orientation* yang dihasilkan dari perbedaan ukuran molekul dan gaya intermolekuler.

Persamaan Wilson dapat digunakan untuk larutan ideal maupun larutan yang sangat tidak ideal. Untuk campuran-campuran biner sangat tidak ideal, misalnya larutan-larutan alkohol dengan hidrokarbon, persamaan Wilson lebih baik karena tidak seperti persamaan NRTL yang memiliki tiga parameter dan secara matematik lebih sederhana dibandingkan persamaan UNIQUAC.

Persamaan Wilson, seperti halnya persamaan Margules dan Van Laar hanya terdiri dari dua parameter untuk sistem biner ( $\Lambda_{12}$  dan  $\Lambda_{21}$ ) yang dinyatakan sebagai berikut :

$$\frac{G^E}{RT} = -x_1 \ln(x_1 + \Lambda_{12}x_2) - x_2 \ln(x_2 + \Lambda_{21}x_1) \quad (2.17)$$

$$\ln \gamma_1 = -\ln(x_1 + \Lambda_{12}x_2) + x_2 \left( \frac{\Lambda_{12}}{x_1 + \Lambda_{12}x_2} + \frac{\Lambda_{21}}{x_1\Lambda_{21} + x_2} \right) \quad (2.18)$$

$$\ln \gamma_2 = -\ln(x_2 + \Lambda_{21}x_1) + x_1 \left( \frac{\Lambda_{12}}{x_1 + \Lambda_{12}x_2} + \frac{\Lambda_{21}}{x_1\Lambda_{21} + x_2} \right) \quad (2.19)$$

$$\Lambda_{12} = \frac{V_2}{V_1} \exp\left(-\frac{\lambda_{12} - \lambda_{11}}{RT}\right) \quad (2.20)$$

$$\Lambda_{21} = \frac{V_1}{V_2} \exp\left(-\frac{\lambda_{21} - \lambda_{22}}{RT}\right) \quad (2.21)$$

Persamaan biner tersebut dikembangkan dari persamaan umum yang juga dapat digunakan untuk komponen lebih dari dua. Persamaan umum koefisien aktifitas adalah sebagai berikut :

$$\ln \gamma_i = -\ln \left( \sum_j^N x_j \Lambda_{ij} \right) + 1 - \sum_K^N \frac{x_K \Lambda_{Ki}}{\sum_K^N x_K \Lambda_{Kj}} \quad (2.22)$$

Kelebihan dari persamaan Wilson ini adalah :

- Dapat digunakan untuk larutan mendekati ideal maupun larutan yang sangat tidak ideal
- Hanya memiliki dua parameter sehingga lebih mudah dalam pengerjaannya
- Untuk campuran biner yang sangat tidak ideal (larutan alkohol dengan hidrokarbon) akan diperoleh hasil prediksi yang lebih baik
- Baik digunakan untuk larutan yang nonpolar
- Dapat dipakai untuk sistem multi komponen

Sementara, kekurangan dari persamaan Wilson ini adalah :

- Tidak dapat digunakan pada larutan yang tidak larut
- Tidak dapat dipakai untuk LLE (Liquid-liquid Equilibrium)
- Tidak dapat dipakai untuk polimer

#### II.4.2 Persamaan NRTL

Persamaan NRTL dikemukakan oleh Renon dan Prauznitz (1968). Persamaan ini diturunkan berdasarkan konsep *local composition* yang dipelopori oleh Wilson. Persamaan NRTL ini dapat digunakan untuk sistem yang larut sebagian maupun untuk sistem yang larut sempurna. Persamaan ini dapat dipakai secara luas dalam VLE, LLE, dan VLLE untuk berbagai jenis zat, misalnya campuran hidrokarbon jenuh dan spesies polar, campuran senyawa non-polar, campuran species non-polar dan polar, campuran air dan species polar, dan campuran alkohol dengan campuran spesies non-polar.

Persamaan NRTL mempunyai tiga parameter, yaitu dengan tambahan parameter ketidakacakan ( $\alpha$ ) yang membuat persamaan tersebut dapat diaplikasikan untuk berbagai jenis campuran dan kesetimbangan cair-cair. Perhitungan parameter



untuk persamaan ini dilakukan dengan menetapkan harga  $\alpha$  pada nilai tertentu dan selanjutnya melakukan optimasi untuk memperoleh dua parameter. Harga  $\alpha$  biasanya berada diantara 0,2 sampai 0,47. Angka ini diperoleh dari beberapa eksperimen system biner. Walaupun lebih rumit, persamaan ini dapat digunakan pada sistem ideal dan non-ideal.

Persamaan NRTL untuk sistem biner dinyatakan dengan :

$$\frac{G^E}{RT} = x_1 x_2 \left( \frac{\tau_{21} G_{21}}{x_1 + x_2 G_{21}} + \frac{\tau_{12} G_{12}}{x_2 + x_1 G_{12}} \right) \quad (2.23)$$

$$\ln \gamma_1 = x_2^2 \left[ \tau_{21} \left[ \frac{G_{21}}{x_1 + x_2 G_{21}} \right]^2 + \frac{\tau_{12} G_{12}}{(x_2 + x_1 G_{12})^2} \right] \quad (2.24)$$

$$\ln \gamma_2 = x_1^2 \left[ \tau_{21} \left[ \frac{G_{12}}{x_2 + x_1 G_{12}} \right]^2 + \frac{\tau_{12} G_{21}}{(x_1 + x_2 G_{21})^2} \right] \quad (2.25)$$

dimana,

$$\ln G_{12} = -\alpha_{12} \tau_{12} \quad (2.26)$$

$$\ln G_{21} = -\alpha_{12} \tau_{21} \quad (2.27)$$

$$\tau_{12} = \frac{b_{12}}{RT} \quad (2.28)$$

$$\tau_{21} = \frac{b_{21}}{RT} \quad (2.29)$$

Persamaan koefisien aktifitas untuk sistem biner dan multikomponen lain dapat diturunkan dari persamaan dasarnya:

$$\ln \gamma_i = \frac{\sum_{j=1}^n \tau_{ji} G_{ji} x_j}{\sum_{k=1}^n G_{ki} x_k} + \sum_{j=1}^n \frac{x_j G_{ij}}{\sum_{k=1}^n G_{kj} x_k} \left( \tau_{ij} - \frac{\sum_{k=1}^n x_k \tau_{kj} G_{kj}}{\sum_{k=1}^n G_{kj} x_k} \right) \quad (2.30)$$

Pengalaman menunjukan bahwa Persamaan model NRTL ini memiliki keandalan yang konsisten dibanding Van Laar dan Margules dalam arti persamaan ini biasanya dapat menangani keadaan-keadaan yang sangat tidak ideal, hanya dengan dua atau tiga parameter yang dapat disesuaikan. Persamaan NRTL sesuai untuk sistem multikomponen. Dapat digunakan untuk system VLE dan LLE. Untuk sistem organik akan diperoleh hasil yang baik dan akurat, dan dapat dipakai untuk larutan yang saling larut sempurna dan yang larut sebagian.

Sementara kekurangan dari persamaan NRTL adalah membutuhkan tiga parameter biner, perlu kehati-hatian dalam pemilihan  $\alpha$  (biasanya diperoleh dari data percobaan sebelumnya), dan tidak dapat dipakai untuk polimer.

### II.4.3 Persamaan UNIQUAC

Persamaan UNIQUAC dikemukakan oleh Abrams dan Prausnitz (1975). Persamaan ini pada dasarnya merupakan kelanjutan dari teori quasi-chemical dari Guggenheim untuk campuran *non-random* yang diaplikasikan untuk larutan yang mengandung molekul-molekul yang memiliki ukuran yang berbeda. Persamaan ini juga dapat digunakan untuk sistem cair yang larut sempurna maupun larut sebagian. Persamaan ini dapat diaplikasikan untuk campuran cair non-elektrolit, baik polar maupun non-polar, seperti hidrokarbon, alkohol, nitril, keton, aldehid, dan sebagainya.

Persamaan UNIQUAC dipisahkan menjadi dua bagian yaitu bagian kombinatorial yang terdiri dari parameter komponen

murni saja untuk menghitung perbedaan bentuk dan ukuran molekul, serta bagian residual yang menggabungkan dua parameter biner tiap pasang molekul untuk menghitung interaksi molekul.

$$g = g^c + g^R \quad (2.31)$$

Untuk sistem multikomponen

$$g^c = \sum_i x_i \ln \frac{\Phi_i}{x_i} + \frac{z}{2} \sum_i q_i x_i \ln \frac{\theta_i}{\Phi_i} \quad (2.32)$$

$$g^R = - \sum_i q_i x_i \ln \left( \sum_j \theta_j \tau_{ji} \right) \quad (2.33)$$

Dimana i, j, k, = 1,2,3...,N (komponen )

$$\theta_i = \frac{x_i q_i}{\sum_j x_j q_j}$$

$$\Phi_i = \frac{\sum_j x_j r_j}{\sum_j x_j r_j} \quad (2.34)$$

$$\tau_{ji} = \exp \left( - \frac{(a_{ji} - a_{ii})}{T} \right) \quad (2.35)$$

$$(2.36)$$

dimana,

$$a_{ii} = a_{jj} = a_{kk} = 0 \quad (2.37)$$

$$a_{ji} = a_{ij} \quad (2.38)$$

dan z = 10 (ditetapkan)

Koefisien aktivitas untuk sembarang komponen  $i$  dinyatakan sebagai berikut:

$$\ln \gamma_i = \ln \frac{\Phi_i}{x_i} + \frac{z}{2} q_i \ln \frac{\theta_i}{\Phi_i} + l_i - \frac{\theta_i}{\Phi_i} \sum_j^N x_j l_j - q_i \ln \left( \sum_j^N \theta_j \tau_{ji} \right) + q_i - q_i \sum_j^N \frac{\theta_j \tau_{ij}}{\sum_K^N \theta_K \tau_{Kj}} \quad (2.39)$$

dan,

$$l_i = \frac{z}{2} (r_i - q_i) - (r_i - 1) \quad (2.40)$$

Model UNIQUAC dapat diterapkan untuk memprediksi kesetimbangan uap-cair sistem multi komponen dengan parameter energi interaksi sistem biner. Keuntungan menggunakan persamaan UNIQUAC adalah hanya mempunyai dua parameter yang dapat disesuaikan, mempunyai ketergantungan yang lebih kecil terhadap suhu, dan dapat diterapkan pada larutan dengan molekul-molekul yang besar atau kecil sebab variabel konsentrasi primer merupakan fraksi permukaan dan bukan fraksi mol.

## II.5 Metode GRG (*Generalized Reduced Gradient*) Nonlinear

Pada tahun 1967, Wolfe mengembangkan metode *reduced gradient* berdasarkan teknik eliminasi variabel sederhana untuk permasalahan dengan constrain berupa persamaan. Metode *Generalized Reduced Gradient* merupakan perluasan metode *reduced gradient* untuk menangani permasalahan dengan constrain berupa pertidaksamaan nonlinear (Arora, 2012). Algoritma metode GRG untuk meminimalkan fungsi  $f(x)$ ,  $x=[x_1, x_2, \dots, x_n]$  dengan constrain  $h_k(x)=0$ ,  $k=1, 2, \dots, K$ , adalah sebagai berikut:

1. Tentukan nilai awal  $x^0$  dan search parameter  $\alpha^0$ , serta error  $\varepsilon$  dan reduction parameter  $\gamma$ ,  $0 < \gamma < 1$ .

2. Bagi  $x$  menjadi  $\hat{x}$  (basic variable) dan  $\bar{x}$  (non-basic variable), dengan ketentuan jumlah non-basic variable merupakan selisih antara jumlah total variabel dengan jumlah persamaan constrain
3. Hitung nilai turunan  $\nabla f(x^{(i)})$  dan  $\nabla \hat{f}(x^{(i)})$
4. Hitung nilai  $C=[\nabla \bar{h}_1; \nabla \bar{h}_2; \dots; \nabla \bar{h}_K]$  dan  $J=[\nabla \hat{h}_1; \nabla \hat{h}_2; \dots; \nabla \hat{h}_K]$
5. Hitung  $\nabla \tilde{f}(x^{(i)}) = \nabla \bar{f}(x^{(i)}) - \nabla \hat{f}(x^{(i)}) J^{-1} C$
6. If  $\|\nabla \tilde{f}(x^{(i)})\| \leq \varepsilon$ , berhenti. Jika tidak, tetapkan  $\bar{d} = -(\nabla \tilde{f})^T$ ,  $\hat{d} = -J^{-1} C \bar{d}$ , dan  $d=(\hat{d}, \bar{d})^T$
7. Tetapkan search parameter  $\alpha=\alpha^0$
8. Untuk  $i=1,2,3,\dots$ :
  - a. Hitung  $v^{(i)} = x^{(i)} + \alpha d$ . Jika  $|h_k(v^{(i)})| \leq \varepsilon$ ,  $k=1,2,\dots,K$ , lanjut ke (d). Jika tidak, lanjutkan.
  - b.  $\hat{v}^{(i+1)} = \hat{v}^{(i)} - J^{-1} \nabla \hat{f}(v^{(i)})$  dan  $\bar{v}^{(i+1)} = \bar{v}^{(i)}$
  - c. Jika  $\|\hat{v}^{(i+1)} - \hat{v}^{(i)}\| > \varepsilon$ , kembali ke (b). Jika tidak, jika  $|h_k(v^{(i)})| \leq \varepsilon$ ,  $k=1,2,\dots,K$ , lanjut ke langkah (d), jika tidak,  $\alpha=\alpha\gamma$  dan kembali ke langkah (a)
  - d. Jika  $f(x^{(i)}) \leq f(v^{(i)})$ ,  $\alpha=\alpha\gamma$  dan kembali ke langkah (a). Jika tidak,  $x^{(i+1)} = v^{(i)}$  dan kembali ke tahap (2).

## **BAB III**

### **METODE PENELITIAN**

#### **III.1 Deskripsi Penelitian**

Secara garis besar penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan data kesetimbangan uap-cair sistem biner 2-butanol + dietil karbonat dan tert-butanol + dietil karbonat secara isothermal pada suhu 303.15 – 323.15 K yang akurat dan mengkorelasikan data eksperimen dengan model Wilson, *Non-Random Two-Liquid* (NRTL), dan *Universal Quasi-Chemical* (UNIQUAC).

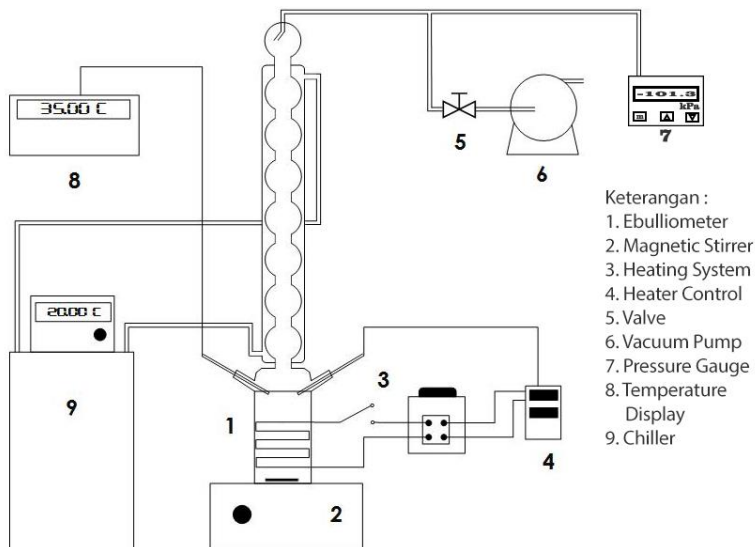
Data kesetimbangan uap-cair sistem biner 2-butanol + dietil karbonat dan tert-butanol + dietil karbonat secara isothermal pada suhu 303.15 – 323.15 K yang didapatkan dalam penelitian ini dapat digunakan dalam mendesain campuran bahan bakar bensin dengan dietil karbonat (DEC) dan alkohol (2-butanol dan tert-butanol).

Peralatan eksperimen yang digunakan pada penelitian ini adalah ebulliometer sederhana yang dikembangkan oleh Oktavian *et al.* (2013) dan divalidasi ulang oleh Wibawa *et al.* (2015). Validasi alat dilakukan kembali dengan membandingkan tekanan uap murni DEC, 2-butanol, dan tert-butanol hasil eksperimen dengan data eksperimen yang telah dikorelasikan menggunakan Persamaan Wagner dan Antoine. Data hasil eksperimen akan dikorelasikan dengan model Wilson, NRTL, dan UNIQUAC untuk masing – masing sistem.

#### **III.2 Peralatan Eksperimen**

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah ebulliometer statis sederhana. Detail peralatan ditunjukkan Gambar 3.1. Peralatan ini memiliki bagian utama yaitu *Ebulliometer Cell*, satu buah kondensor untuk kondensasi uap, beberapa alat pelengkap seperti pompa vakum (VALUE VG140)

untuk mengatur tekanan operasi, *magnetic stirrer* sebagai pengaduk, Indikator perekam suhu (AUTONICS TC4S) dan *Thermocouple* RTD Pt 100 (*Four-wire*) dengan akurasi  $\pm 0.1$  K, *Pressure gauge* (AUTONICS PSAN) dengan akurasi  $\pm 0.1$  kPa dan *Ambient pressure gauge* (Lutron MHB 382SD). Ebulliometer yang digunakan merupakan alat yang dikembangkan oleh Oktavian *et al.* (2013) dan divalidasi ulang oleh Wibawa *et al.* (2015) dimana perubahan komposisi awal tidak signifikan pada saat terjadi kesetimbangan.



**Gambar 3.1** Skema Alat Ebulliometer (Oktavian *et al.*, 2013)  
(Wibawa *et al.*, 2015)

### III.3 Bahan Eksperimen

Bahan-bahan yang digunakan pada eksperimen ini adalah 2-butanol p.a dengan kemurnian  $\geq 99\%$  yang disupply dari MERCK, tert-butanol p.a dengan kemurnian  $\geq 99.5\%$  yang

disupply dari MERCK, dan DEC p.a dengan kemurnian 99.92% yang disupply dari WUHAN FORTUNA CHEMICALS.

### III.4 Variabel Eksperimen

Variabel dalam eksperimen ini adalah:

1. Komposisi larutan 2-butanol + DEC dan tert-butanol + DEC pada *range* 0 – 1 dengan interval 0.1 (fraksi mol)
2. Suhu sistem pada *range* 303.15 – 323.15 K dengan interval 5.00 K

### III.5 Prosedur Eksperimen

Penelitian kesetimbangan uap-cair ini menggunakan dua sistem biner, yakni 2-butanol + DEC dan tert-butanol + DEC secara isothermal. Prosedur eksperimen penelitian diawali dengan memasukkan campuran dengan komposisi tertentu dengan volume kurang lebih 225 mL ke dalam *ebullimeter cell*. Setelah itu tekanan vakum diatur dengan menggunakan pompa vakum. Kondensor dialiri oleh air pendingin terlebih dahulu, kemudian *magnetic stirrer* dinyalakan untuk mengaduk larutan agar campuran merata. Sistem pemanas dinyalakan untuk memanaskan larutan sesuai suhu variabel. Pemanasan ini mengakibatkan sebagian liquid menguap dan selanjutnya uap akan masuk pada kondensor. Pembacaan suhu dalam sistem terbaca oleh termokopel (2) dan pembacaan tekanan terbaca oleh *pressure gauge*.

### III.6 Data Treatment

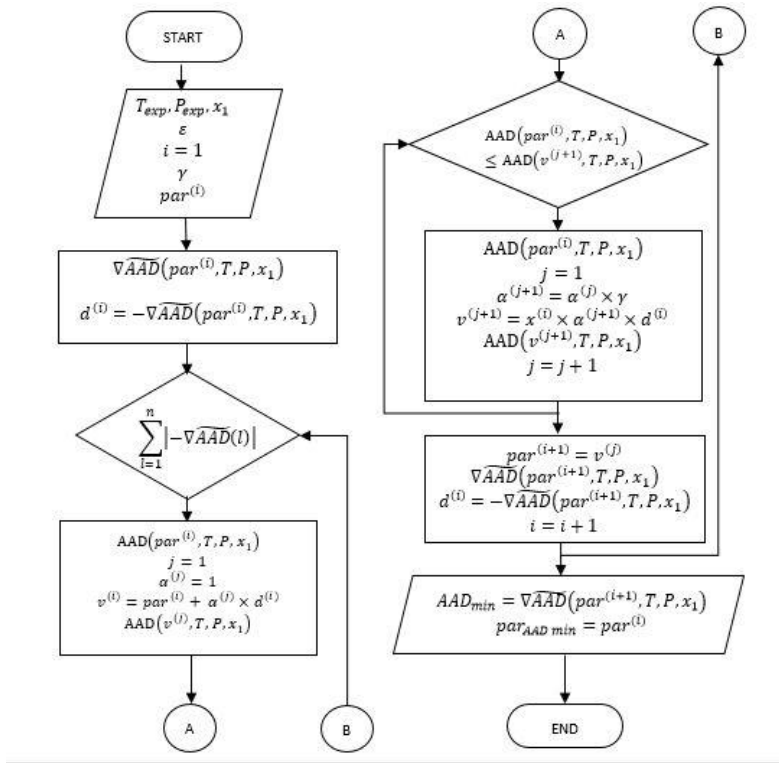
Berdasarkan eksperimen ini, data yang diperoleh yaitu  $x_i$  (molar fraksi komponen  $i$  dalam fase liquid),  $P$  (tekanan sistem), dan  $T$  (suhu sistem). Berdasarkan validasi alat, diperoleh juga tekanan uap murni komponen,  $P_i^{sat}$ . Selanjutnya data eksperimen tersebut dikorelasikan dengan persamaan Wilson, NRTL, dan UNIQUAC. Korelasi diawali dengan memprediksi parameter-parameter pada masing-masing persamaan. Dari parameter-parameter yang diprediksi tersebut, selanjutnya dihitung koefisien



aktifitas,  $\gamma_i$ , dengan persamaan Wilson, NRTL, dan UNIQUAC. Nilai  $\gamma_i$  kemudian digunakan untuk menghitung tekanan uap korelasi. Kemudian dihitung *average absolute deviation* (AAD) antara tekanan uap eksperimen dengan tekanan uap korelasi. Dengan metode GRG (*Generalized Reduced Gradient*) nonlinear, nilai AAD diminimalkan dengan mengubah nilai parameter-parameter model korelasi. Sehingga diperoleh parameter-parameter dengan AAD terkecil masing-masing untuk korelasi model Wilson, NRTL, dan UNIQUAC. Gambar 3.2 menunjukkan algoritma untuk mengkorelasikan data eksperimen dengan persamaan Wilson, NRTL, dan UNIQUAC. *par* merupakan nilai parameter untuk masing-masing model korelasi, dimana pada sistem biner, *par*=[ $a_{12}$ ,  $a_{21}$ ] untuk model korelasi Wilson, *par*=[ $b_{12}$ ,  $b_{21}$ , dan  $\alpha$ ] untuk model korelasi NRTL, dan *par*=[ $\Delta u_{12}$ ,  $\Delta u_{21}$ ] untuk model korelasi UNIQUAC.

AAD pada Persamaan (3.1) membutuhkan data tekanan hasil korelasi,  $P_{cal}$ , dan tekanan hasil eksperimen,  $P_{exp}$ . Berdasarkan Persamaan (2.16), untuk menghitung  $P_{cal}$  dibutuhkan data komposisi ( $x_i$ ), koefisien aktifitas, ( $\gamma$ ), dan tekanan *saturated* ( $P_i^{sat}$ ).  $P_i^{sat}$  merupakan tekanan jenuh komponen murni pada suhu tertentu sehingga,  $P_i^{sat} = f(T)$ . Sedangkan untuk nilai koefisien aktifitas,  $\gamma = f(par, x_i, T)$ , diperoleh dari persamaan model korelasi. Untuk model Wilson menggunakan Persamaan (2.17-2.22), sedangkan untuk model NRTL menggunakan Persamaan (2.23-2.30), dan untuk model UNIQUAC menggunakan Persamaan (2.31-2.40). Oleh karena itu, AAD merupakan fungsi dari *par*, suhu, dan komposisi,  $AAD = f(par, T, x_i)$ .

$$AAD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{P_{cal} - P_{exp}}{P_{exp}} \times 100\% \right| \quad (3.1)$$



**Gambar 3.2** Diagram alir perhitungan parameter dengan persamaan Wilson, NRTL, dan UNIQUAC

### III.7 Estimasi *Uncertainty* pada Eksperimen

*Uncertainty* data hasil eksperimen pada penelitian ini bersumber dari keterbatasan *readability* peralatan dan *uncertainty* pengukuran. *Uncertainty* pembacaan temperatur berasal dari *uncertainty* indikator perekam suhu (YOKOGAWA 7563) dan RTD Pt 100 (*four-wire*), yang memiliki *uncertainty* sebesar  $\pm 0.01$  K, *Uncertainty equilibrium measurement* adalah  $\pm 0.1$  kPa, dan *uncertainty* data fraksi mol berasal dari *uncertainty* pembacaan

massa pada neraca analitis OHAUS Analytical Plus AP210 dengan *uncertainty*  $\pm 0.0001$  g. Berdasarkan analisa *uncertainty*, *uncertainty* pengukuran fraksi mol maksimum pada eksperimen ini sebesar 0.0003842%. Sedangkan *uncertainty* tekanan sistem maksimum sebesar 5.61%, yang terjadi pada pengukuran tekanan sistem terendah yaitu tekanan uap murni DEC pada suhu 30 °C atau 303.15 K.

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan data kesetimbangan uap-cair sistem biner 2-butanol + dietil karbonat (DEC) dan tert-butanol + dietil karbonat (DEC) secara isothermal pada suhu 303.15 K – 323.15 K yang akurat dan mengkorelasikan data eksperimen tersebut dengan model Wilson, NRTL, dan UNIQUAC. Variabel yang digunakan pada eksperimen ini adalah komposisi larutan 2-butanol + DEC dan tert-butanol + DEC pada *range* 0 – 1 dengan interval 0.1 (fraksi mol) dan suhu sistem pada *range* 303.15 K – 323.15 K dengan interval 5.00 K.

#### IV.1 Validasi Alat

Untuk mengetahui kelayakan alat penelitian, dilakukan validasi alat dengan cara membandingkan tekanan uap murni 2-butanol, tert-butanol, dan DEC hasil percobaan dengan tekanan uap murni yang didapatkan dari perhitungan menggunakan parameter Antoine dan parameter Wagner (literatur). Tekanan uap murni literatur dari 2-butanol, tert-butanol dihitung menggunakan persamaan Wagner (4.1), sedangkan DEC dihitung menggunakan persamaan Antoine (4.2) (Poling *et al.*, 1986). Parameter Wagner untuk komponen murni 2-butanol dan tert-butanol diperoleh dari Poling *et al.* (1986) dan parameter Antoine untuk DEC diperoleh dari Luo *et al.* (2000).

$$\ln P_{vpr} (kPa) = \frac{a\tau + b\tau^{1.5} + c\tau^{2.5} + d\tau^5}{T_r} \quad (4.1)$$

$$\log_{10} P_{vp} (kPa) = A - \frac{B}{T(K) + C} \quad (4.2)$$

**Tabel 4.1** Parameter Wagner 2-Butanol dan tert-butanol (Poling *et al.*, 1986).

Komponen	A	b	c	D
2-butanol	-8.0982	1.64406	-7.49	-5.27355
Tert-butanol	-8.47927	2.47845	-9.27918	-2.53992

**Tabel 4.2** Parameter Antoine DEC (Luo *et al.*, 2000)

Komponen	A	B	C
DEC	5.883	1223.77	-84.304

Perbandingan antara data hasil eksperimen dengan data hasil perhitungan persamaan Wagner dan persamaan Antoine ditetapkan berdasarkan persamaan *average absolute deviation* (AAD) berikut:

$$AAD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{P_{exp} - P_{lit}}{P_{lit}} \times 100\% \right| \quad (4.3)$$

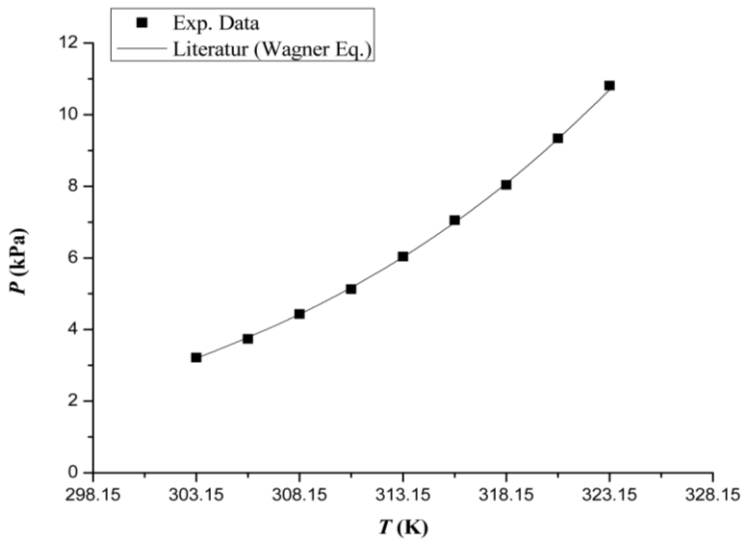
$P_{exp}$  adalah tekanan uap yang dipoleh dari eksperimen sedangkan  $P_{lit}$  adalah tekanan uap yang diperoleh berdasarkan perhitungan dengan persamaan Antoine dan Wagner dan n adalah jumlah data.

Tabel 4.3 menunjukkan tekanan uap 2-butanol hasil eksperimen dan perhitungan persamaan Wagner untuk validasi alat. Gambar 4.1 menunjukkan hubungan antara tekanan uap eksperimen dan perhitungan persamaan Wagner terhadap suhu. Nilai AAD yang didapat adalah 0.6%.

**Tabel 4.3** Tekanan Uap 2-Butanol

$T / \text{K}$	$P_{\text{exp}} / \text{kPa}$	$P_{\text{lit}} / \text{kPa}$
303.15	3.22	3.20
305.65	3.74	3.76
308.15	4.43	4.41
310.65	5.13	5.16
313.15	6.04	6.00
315.65	7.05	6.97
318.15	8.04	8.06
320.65	9.34	9.30
323.15	10.81	10.69

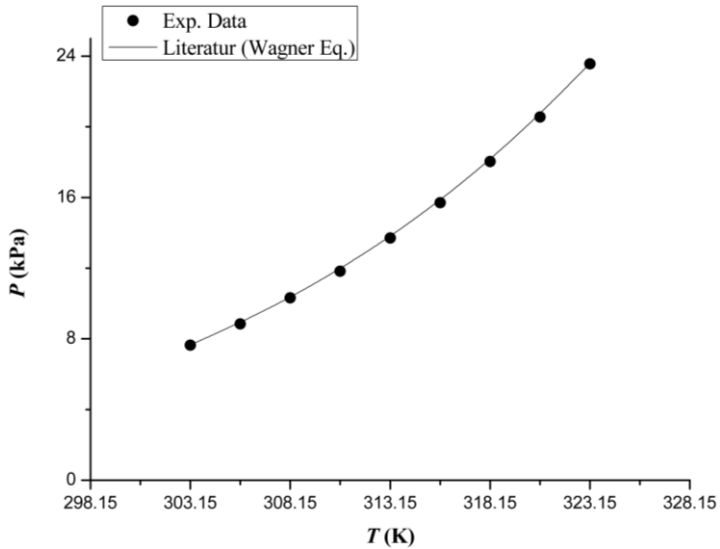
**AAD = 0.6%**

**Gambar 4.1** Hubungan Tekanan Uap dan Suhu pada Validasi Alat menggunakan 2-Butanol Murni

Tabel 4.4 menunjukkan tekanan uap tert-butanol hasil eksperimen dan perhitungan persamaan Wagner untuk validasi alat. Gambar 4.2 menunjukkan hubungan antara tekanan uap eksperimen dan perhitungan persamaan Wagner terhadap suhu. Nilai AAD yang didapat adalah 0.6%.

**Tabel 4.4** Tekanan Uap Tert-Butanol

$T / \text{K}$	$P_{exp} / \text{kPa}$	$P_{lit} / \text{kPa}$
303.15	7.64	7.66
305.65	8.84	8.92
308.15	10.32	10.34
310.65	11.82	11.96
313.15	13.71	13.78
315.65	15.71	15.83
318.15	18.03	18.13
320.65	20.55	20.71
323.15	23.56	23.59
<b>AAD = 0.6%</b>		



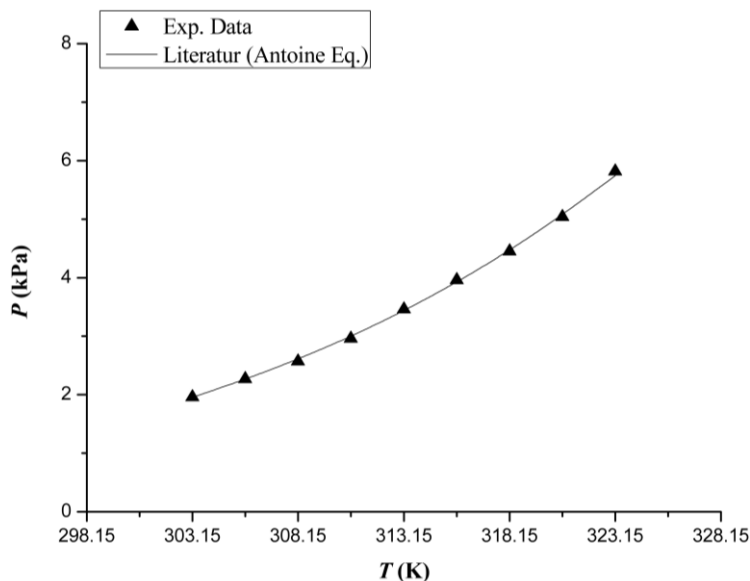
**Gambar 4.2** Hubungan Tekanan Uap dan Suhu pada Validasi Alat menggunakan tert-butanol Murni

Tabel 4.5 menunjukkan tekanan uap DEC hasil eksperimen dan perhitungan persamaan Antoine untuk validasi alat. Gambar 4.3 menunjukkan hubungan antara tekanan uap eksperimen dan perhitungan persamaan Antoine terhadap suhu. Nilai AAD yang didapat adalah 0.8%.



**Tabel 4.5** Tekanan Uap DEC

$T / \text{K}$	$P_{exp} / \text{kPa}$	$P_{lit} / \text{kPa}$
303.15	1.96	1.95
305.65	2.27	2.26
308.15	2.57	2.61
310.65	2.96	2.99
313.15	3.46	3.43
315.65	3.96	3.92
318.15	4.45	4.46
320.65	5.04	5.07
323.15	5.82	5.75
<b>AAD = 0.8%</b>		



**Gambar 4.3** Hubungan Tekanan Uap dan Suhu pada Validasi Alat menggunakan DEC Murni

Berdasarkan data eksperimen dan perhitungan, nilai AAD yang diperoleh pada validasi alat Ebuliometer sebesar 0.6% untuk sistem 2-butanol murni, 0.6% untuk sistem tert-butanol murni, dan 0.8% untuk sistem DEC murni. Hal ini menunjukkan bahwa alat ebuliometer yang digunakan pada eksperimen ini layak digunakan. AAD sistem DEC bernilai paling besar, kemudian diikuti oleh 2-butanol dan tert-butanol. Hal ini dikarenakan tekanan uap DEC bernilai paling rendah dibandingkan kedua senyawa lainnya pada rentang suhu tersebut. Sehingga perbedaan tekanan uap yang sedikit akan menghasilkan nilai AAD yang besar karena pembandingnya rendah.

## **IV.2 Data Eksperimen Pengukuran Tekanan Uap**

### **IV.2.1 Sistem Biner Tert-Butanol (1) + DEC (2)**

Eksperimen ini dilakukan dengan cara mengukur tekanan uap campuran sistem tert-butanol (1) + DEC (2) pada kondisi setimbang (*equilibrium*) dengan variabel fraksi mol tert-butanol pada *range* 0 – 1 dengan interval 0.1 dan suhu sistem pada *range* 303.15 K – 323.15 K dengan interval 5.00 K. Berikut merupakan data hasil eksperimen tekanan uap sistem biner tert-butanol (1) + DEC (2) pada berbagai suhu :

**Tabel 4.6** Data Eksperimen Tekanan Uap Sistem Tert-Butanol (1) + DEC (2)

$T = 303.15 \text{ K}$		$T = 308.15 \text{ K}$		$T = 313.15 \text{ K}$		$T = 318.15 \text{ K}$		$T = 323.15 \text{ K}$	
$x_l$	$P_{exp} / \text{kPa}$	$x_l$	$P_{exp} / \text{kPa}$	$x_l$	$P_{exp} / \text{kPa}$	$x_l$	$P_{exp} / \text{kPa}$	$x_l$	$P_{exp} / \text{kPa}$
0	1.96	0	2.67	0	3.56	0	4.55	0	5.55
0.1001	3.62	0.1001	4.61	0.1001	5.71	0.1001	7.6	0.1001	9.97
0.2001	4.37	0.2001	5.67	0.2001	7.51	0.2001	10.05	0.2001	12.75
0.3008	5.34	0.3008	7.14	0.3008	8.95	0.3008	11.38	0.3008	14.54
0.4005	6.26	0.4005	7.54	0.4005	9.72	0.4005	13.12	0.4005	16.68
0.5004	6.33	0.5004	8.02	0.5004	10.55	0.5004	14.2	0.5004	17.96
0.6006	6.62	0.6006	8.46	0.6006	11.5	0.6006	15.26	0.6006	19.57
0.7002	7.1	0.7002	8.97	0.7002	12.02	0.7002	15.78	0.7002	20.21
0.8001	7.4	0.8001	9.4	0.8001	12.57	0.8001	16.35	0.8001	21.03
0.9002	7.67	0.9002	9.69	0.9002	12.91	0.9002	17.36	0.9002	22.06
1	7.94	1	10.22	1	13.51	1	17.83	1	23.16

#### **IV.2.2 Sistem Biner 2-Butanol (1) + DEC (2)**

Tekanan uap campuran pada sistem biner 2-Butanol (1) + DEC (2) didapatkan dengan metode yang sama seperti sistem sebelumnya dengan variabel fraksi mol 2-Butanol pada *range* 0 – 1 dengan interval 0.1 dan suhu sistem pada *range* 303.15 K – 323.15 K dengan interval 5.00 K. Berikut merupakan data hasil eksperimen tekanan uap sistem biner 2-Butanol (1) + DEC (2) pada berbagai suhu:

**Tabel 4.7** Data Eksperimen Tekanan Uap Sistem 2-Butanol (1) + DEC (2)

$T = 303.15 \text{ K}$		$T = 308.15 \text{ K}$		$T = 313.15 \text{ K}$		$T = 318.15 \text{ K}$		$T = 323.15 \text{ K}$	
$x_1$	$P_{exp} / \text{kPa}$	$x_1$	$P_{exp} / \text{kPa}$	$x_1$	$P_{exp} / \text{kPa}$	$x_1$	$P_{exp} / \text{kPa}$	$x_1$	$P_{exp} / \text{kPa}$
0	1.96	0	2.67	0	3.56	0	4.55	0	5.55
0.1001	2.72	0.1001	3.73	0.1001	4.74	0.1001	6.16	0.1001	7.89
0.2001	2.93	0.2001	4.02	0.2001	5.42	0.2001	7.01	0.2001	8.62
0.3008	2.98	0.3008	4.28	0.3008	5.78	0.3008	7.49	0.3008	9.41
0.4005	3.17	0.4005	4.31	0.4005	5.61	0.4005	7.42	0.4005	9.61
0.5004	3.23	0.5004	4.52	0.5004	5.93	0.5004	7.92	0.5004	9.93
0.6006	3.4	0.6006	4.49	0.6006	5.88	0.6006	7.75	0.6006	10.22
0.7002	3.05	0.7002	4.44	0.7002	6.01	0.7002	8	0.7002	10.67
0.8001	3.41	0.8001	4.61	0.8001	6.03	0.8001	7.96	0.8001	10.56
0.9002	3.27	0.9002	4.67	0.9002	6.26	0.9002	8.07	0.9002	10.76
1	3.22	1	4.43	1	6.04	1	8.04	1	10.81

### IV.3 Korelasi dengan Model Wilson, NRTL, UNIQUAC

#### IV.3.1 Sistem Biner tert-Butanol (1) + DEC (2)

Kondisi equilibrium merupakan kondisi ketika suatu sistem tidak mengalami kecenderungan berubah secara makroskopis. Hal ini ditunjukkan dengan tidak adanya perubahan tekanan, suhu, maupun komposisi pada sistem tersebut. Dalam suatu sistem, uap mempunyai kecenderungan untuk berubah fase menjadi liquid dan begitu pula sebaliknya, kecenderungan tersebut diukur sebagai  $f$  atau fugasitas. Pada kondisi setimbang, fugasitas liquid sama dengan fugasitas uapnya.

Berdasarkan data eksperimen pada sistem biner tert-butanol (1) + DEC (2), diperoleh tekanan uap campuran berkisar diantara 1 – 24 kPa (0.01 – 0.24 atm) dimana hal tersebut menandakan sistem berada pada tekanan yang rendah ( $< 1$  atm). Oleh karena itu berlaku hukum gas ideal dimana  $\Phi_i$  bernilai 1 (Smith et al., 2001). Sedangkan ditinjau dari larutan yang digunakan pada sistem ini, tert-butanol dan DEC memiliki jenis molekul yang sangat berbeda dimana tert-butanol merupakan jenis alkohol dan DEC merupakan jenis karbonat. Hal tersebut menyebabkan penyimpangan dari larutan ideal dalam fase liquid. Oleh karena itu, terdapat koefisien aktifitas,  $\gamma$ , yang digunakan sebagai faktor tidak idealnya fase liquid dalam larutan (Smith et al., 2001). Berdasarkan hal tersebut, maka perhitungan tekanan uap campuran menggunakan Persamaan (2.16):

$$P = \sum_i x_i \gamma_i P_i^{sat} \quad (2.16)$$

Korelasi dilakukan dengan menggunakan persamaan Wilson, NRTL dan UNIQUAC untuk mengoptimasi nilai parameter pada masing-masing persamaan. Parameter – parameter sistem tert-butanol (1) + DEC (2) pada tiap persamaan didapatkan dengan meminimalkan nilai AAD berdasarkan perbedaan tekanan uap eksperimen dan korelasi, dengan Persamaan (3.1):

$$AAD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{P_{calc} - P_{exp}}{P_{exp}} \times 100\% \right| \quad (3.1)$$

Parameter yang digunakan pada persamaan Wilson sebagai berikut.

$$\Lambda_{12} = \frac{V_2}{V_1} \exp \frac{-a_{12}}{RT} ; \quad \Lambda_{12} = \frac{V_2}{V_1} \exp \frac{-a_{12}}{RT}$$

(4.4)

Untuk korelasi menggunakan persamaan NRTL digunakan parameter sebagai berikut.

$$\tau_{12} = \frac{b_{12}}{RT} ; \quad \tau_{21} = \frac{b_{21}}{RT} ; \alpha_{12} \quad (4.5)$$

Untuk korelasi menggunakan persamaan UNIQUAC digunakan parameter sebagai berikut.

$$\Delta u_{21} = u_{21} - u_{11} \text{ dan } \Delta u_{12} = u_{12} - u_{22} \quad (4.6)$$

Nilai *initial value* masing-masing parameter yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 4.8.

**Tabel 4.8** *Initial Value* Masing-masing Parameter

Wilson		NRTL		UNIQUAC	
$u_{12}$	3871	$b_{12}$	2602	$\Delta u_{12}$	-440
$u_{21}$	652	$b_{21}$	2332	$\Delta u_{21}$	1893

Nilai parameter dan AAD hasil optimasi menggunakan persamaan Wilson, NRTL dan UNIQUAC ditunjukkan pada Tabel 4.9.

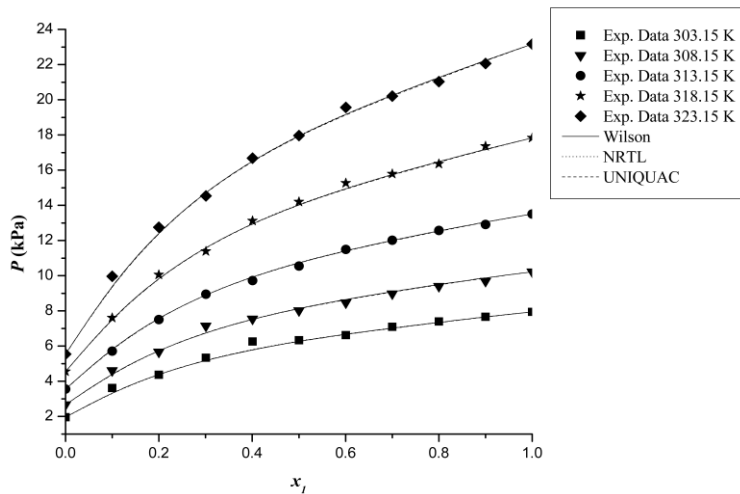


**Tabel 4.9** Parameter dan AAD Hasil Korelasi

Wilson		NRTL			UNIQUAC	
$a_{12}$	$a_{21}$	A	$b_{12}$	$b_{21}$	$\Delta u_{12}$	$\Delta u_{21}$
1295.4	1383.8	0.3	2119.7	441.8	371.1	196.7
AAD = 1.3%		AAD = 1.3%			AAD = 1.3%	

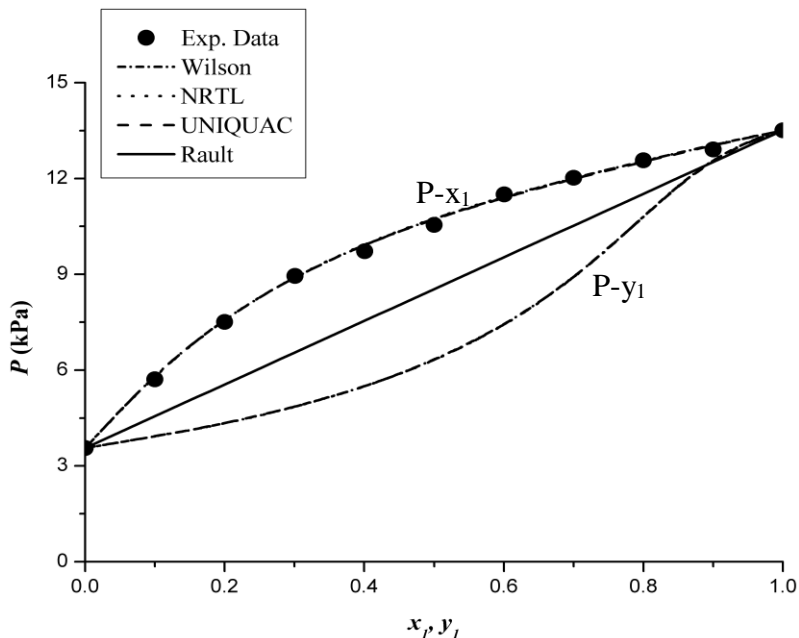
Berdasarkan hasil perhitungan, nilai AAD yang didapatkan dengan menggunakan persamaan Wilson sebesar 1.3% diikuti dengan persamaan NRTL sebesar 1.3% dan yang terbesar adalah persamaan UNIQUAC dengan nilai AAD 1.3%. AAD yang didapatkan tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan dari ketiga persamaan tersebut. Sehingga untuk sistem tert-butanol (1) + DEC (2), persamaan Wilson, NRTL, dan UNIQUAC dapat digunakan untuk menentukan parameter dengan hasil yang baik.

Selanjutnya, data eksperimen yang telah didapatkan dikorelasikan dengan menggunakan konsep aktivitas koefisien, yakni Wilson, NRTL, dan UNIQUAC. Data tekanan eksperimen dan tekanan korelasi menggunakan persamaan Wilson, NRTL, dan UNIQUAC pada sistem tert-butanol (1) + DEC (2) untuk tiap-tiap variabel suhu ditunjukkan dalam Gambar 4.4. Grafik pada Gambar 4.4 memperlihatkan bahwa peningkatan suhu sistem menyebabkan kenaikan tekanan uap campuran pada sistem tersebut. Selain itu, pada setiap variabel suhu menunjukkan tekanan campuran yang meningkat dengan bertambahnya komposisi dari tert-butanol ( $x_1$ ), dimana tekanan campuran berada diantara tekanan uap murni masing-masing komponennya.



**Gambar 4.4** Grafik  $P$ - $x_1$  untuk Sistem Biner tert-butanol (1) + DEC (2) pada Berbagai Suhu

Peralatan yang digunakan pada eksperimen ini merupakan peralatan pengukuran kesetimbangan uap - cair sederhana yang dikembangkan oleh Oktavian et al. (2013) dengan konsep tidak terjadi perubahan komposisi awal larutan dengan komposisi larutan saat setimbang, sehingga tidak memerlukan analisa komposisi larutan. Selain itu, komposisi uap saat setimbang tidak dapat dianalisa. Namun, komposisi fraksi mol dapat diperoleh berdasarkan konsep kesetimbangan dengan menggunakan nilai koefisien aktivitas yang diperoleh dari persamaan Wilson, NRTL, dan UNIQUAC. Hasil perhitungan setiap nilai  $y_1$  selanjutnya di plot terhadap tekanan uap masing-masing korelasi bersamaan dengan  $x_1$ , seperti pada Gambar 4.5. Grafik  $P$ - $x_1$ ,  $y_1$  pada Gambar 4.5 menunjukkan pada sistem tert-butanol (1) + DEC (2) tidak terdapat azeotrop ( $x_i = y_i$ ).



**Gambar 4.5** Grafik  $P$ - $x_1, y_1$  untuk Sistem Biner tert-butanol (1) + DEC (2) pada Suhu 313.15 K

#### IV.3.2 Sistem Biner 2-Butanol (1) + DEC (2)

Tekanan uap campuran pada sistem biner 2-butanol (1) + DEC (2) didapatkan dengan metode, variabel fraksi mol, dan variabel suhu yang sama seperti sistem sebelumnya.

Berdasarkan data eksperimen pada sistem biner 2-butanol (1) + DEC (2), diperoleh tekanan uap campuran berkisar diantara 1 – 11 kPa (0.01 – 0.11 atm) dimana hal tersebut menandakan sistem berada pada tekanan yang rendah ( $< 1$  atm). Oleh karena itu berlaku hukum gas ideal dimana  $\Phi_i$  bernilai 1 (Smith et al., 2001). Sedangkan ditinjau dari larutan yang digunakan pada sistem ini, 2-butanol dan DEC memiliki jenis molekul yang sangat

berbeda dimana tert-butanol merupakan jenis alkohol dan DEC merupakan jenis karbonat. Hal tersebut menyebabkan penyimpangan dari larutan ideal dalam fase liquid. Oleh karena itu, terdapat koefisien aktifitas,  $\gamma$ , yang digunakan sebagai faktor tidak idealnya fase liquid dalam larutan (Smith et al., 2001). Berdasarkan hal tersebut, maka perhitungan tekanan uap campuran menggunakan Persamaan (2.16):

$$P = \sum_i x_i \gamma_i P_i^{sat} \quad (2.16)$$

Korelasi dilakukan dengan menggunakan persamaan Wilson, NRTL dan UNIQUAC untuk mengoptimasi nilai parameter pada masing-masing persamaan. Parameter – parameter sistem 2-butanol (1) + DEC (2) pada tiap persamaan didapatkan dengan meminimalkan nilai AAD berdasarkan perbedaan tekanan uap eksperimen dan korelasi, dengan Persamaan (3.1):

$$AAD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{P_{exp} - P_{calc}}{P_{exp}} \times 100\% \right| \quad (3.1)$$

Parameter yang digunakan pada persamaan Wilson sebagai berikut.

$$\Lambda_{12} = \frac{V_2}{V_1} \exp \frac{-a_{12}}{RT} ; \quad \Lambda_{21} = \frac{V_1}{V_2} \exp \frac{-a_{21}}{RT}$$

(4.4)

Untuk korelasi menggunakan persamaan NRTL digunakan parameter sebagai berikut.

$$\tau_{12} = \frac{b_{12}}{RT} ; \quad \tau_{21} = \frac{b_{21}}{RT} ; \alpha_{12}$$

(4.5)

Untuk korelasi menggunakan persamaan UNIQUAC digunakan parameter sebagai berikut.

$$\Delta u_{21} = u_{21} - u_{11} \text{ dan } \Delta u_{12} = u_{12} - u_{22} \quad (4.6)$$

Nilai *initial value* masing-masing parameter yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 4.10.

**Tabel 4.10** *Initial Value* Masing-masing Parameter

Wilson		NRTL		UNIQUAC	
$u_{12}$	3871	$b_{12}$	2602	$\Delta u_{12}$	-440
$u_{21}$	652	$b_{21}$	2332	$\Delta u_{21}$	1893

Nilai parameter dan AAD hasil optimasi menggunakan persamaan Wilson, NRTL dan UNIQUAC ditunjukkan pada Tabel 4.11.

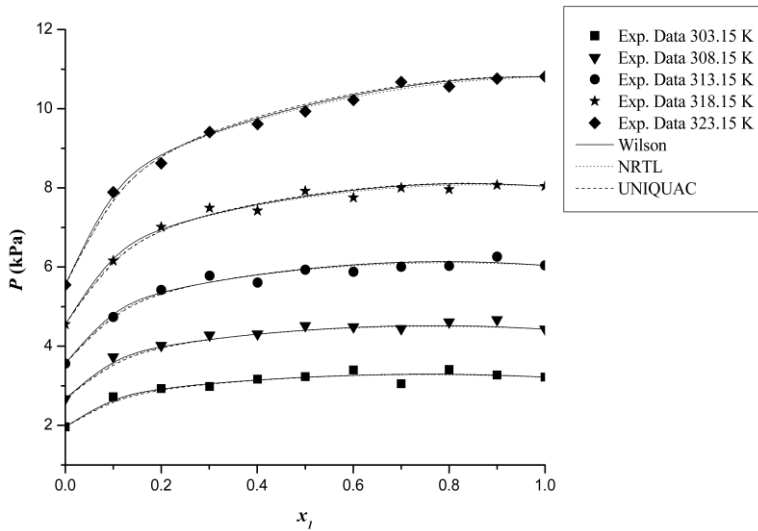
**Tabel 4.11** Parameter dan AAD Hasil Korelasi

Wilson		NRTL			UNIQUAC	
$u_{12}$	$u_{21}$	A	$b_{12}$	$b_{21}$	$\Delta u_{12}$	$\Delta u_{21}$
5916.7	-1114.9	0.3	-1194.1	5236.0	1210.4	2547.7
AAD = 1.5%		AAD = 1.4%			AAD = 1.5%	

Berdasarkan hasil perhitungan, nilai AAD yang didapatkan dengan menggunakan persamaan Wilson sebesar 1.5% diikuti dengan persamaan NRTL sebesar 1.4% dan yang terbesar adalah persamaan UNIQUAC dengan nilai AAD 1.5%. AAD yang didapatkan tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan dari ketiga persamaan tersebut. Sehingga untuk sistem 2-butanol (1) + DEC (2), persamaan Wilson, NRTL, dan UNIQUAC dapat digunakan untuk menentukan parameter dengan hasil yang baik.

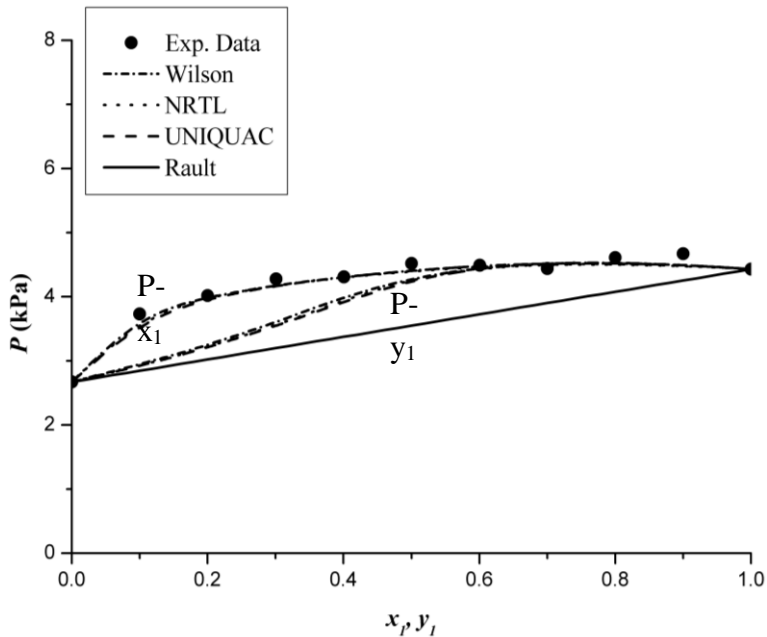
Selanjutnya, data eksperimen yang telah didapatkan dikorelasikan dengan menggunakan konsep aktivitas koefisien, yakni Wilson, NRTL, dan UNIQUAC. Data tekanan eksperimen dan tekanan korelasi menggunakan persamaan Wilson, NRTL, dan UNIQUAC pada sistem 2-butanol (1) + DEC (2) untuk tiap-tiap variabel suhu ditunjukkan dalam Gambar 4.6. Grafik pada Gambar

4.6 memperlihatkan bahwa peningkatan suhu sistem menyebabkan kenaikan tekanan uap campuran pada sistem tersebut. Sedangkan pada setiap variabel suhu, seiring bertambahnya komposisi dari tert-butanol ( $x_I$ ), tekanan uap campuran meningkat hingga mencapai titik puncak kemudian menurun hingga mendekati tekanan uap murni 2-butanol.



**Gambar 4.6** Grafik  $P$ - $x_I$  untuk Sistem Biner 2-butanol (1) + DEC (2) pada Berbagai Suhu

Komposisi fasa uap  $y_I$  yang diperoleh melalui perhitungan diplot dengan tekanan,  $P$ . Hasil plot tekanan  $P$  terhadap  $y_I$  dan  $x_I$ , ditunjukkan pada Gambar 4.7. Grafik  $P$ - $x_I$ ,  $y_I$  pada Gambar 4.7 menunjukkan pada sistem 2-butanol (1) + DEC (2) terdapat azeotrop ( $x_I = y_I$ ).



**Gambar 4.7** Grafik  $P$ - $x_1$ ,  $y_1$  untuk Sistem Biner 2-butanol (1) + DEC (2) pada Suhu 308.15 K

Pada titik azeotrop, fase cair yang mendidih menghasilkan fase uap dengan komposisi yang sama ( $x_i = y_i$ ) dan tidak terjadi perubahan komposisi pada fase cair yang menguap. (Smith *et al.*, 2001). Titik azeotrop sistem biner 2-butanol (1) + DEC (2) pada tiap suhu didapatkan dengan menggunakan *relative volatility* sesuai Persamaan (4.3):

$$\alpha = \frac{y_1/x_1}{y_2/x_2} \quad (4.3)$$

Dimana pada azeotrop,  $\alpha = 1$  sehingga komposisi dan tekanan azeotrop pada sistem untuk dapat diketahui, ditunjukkan pada Tabel 4.12.

**Tabel 4.12** Hasil Perhitungan Titik Azeotrop Sistem Biner 2-butanol (1) + DEC (2)

$T / K$	Wilson		NRTL		UNIQUAC	
	$x_1$	$P_{az} / \text{kPa}$	$x_1$	$P_{az} / \text{kPa}$	$x_1$	$P_{az} / \text{kPa}$
303.15	0.76	3.30	0.75	3.29	0.76	3.29
308.15	0.77	4.53	0.77	4.51	0.77	4.53
313.15	0.79	6.14	0.80	6.12	0.79	6.15
318.15	0.84	8.11	0.86	8.08	0.83	8.13
323.15	0.97	10.81	-	-	0.95	10.82

Berdasarkan Tabel 4.12 menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu, komposisi azeotrop komponen 2-butanol ( $x_1$ ) pada sistem 2-butanol (1) + DEC (2) semakin besar. Hasil perhitungan titik azeotrop dari persamaan Wilson, NRTL, dan UNIQUAC tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan kecuali pada titik azeotrop hasil persamaan NRTL pada suhu 323.15 K yang tidak dapat ditentukan karena menunjukkan hasil komposisi negatif. Namun, pada suhu yang lebih rendah, tidak terdapat fenomena yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa persamaan NRTL kurang tepat digunakan untuk menentukan titik azeotrop untuk suhu yang lebih tinggi pada sistem biner 2-butanol (1) + DEC (2).

#### IV.4 Deviasi Terhadap Hukum Raoult

Hukum Raoult menyatakan bahwa tekanan uap larutan ideal dipengaruhi oleh tekanan uap pelarut dan fraksi mol zat terlarut yang terkandung dalam larutan tersebut.

$$y_1 P = x_1 P_1^{sat} \quad (4.6)$$

Terdapat dua asumsi utama yang dibutuhkan untuk mengaplikasikan hukum Raoult pada sebuah campuran uap-cair,



yaitu kedua fase tersebut dalam keadaan ideal. Untuk larutan yang mengikuti hukum Raoult, interaksi antara molekul individual kedua komponen sama dengan interaksi antara molekul dalam tiap komponen. Sedangkan campuran yang memiliki gaya tarik dari interaksi antar molekul individual kedua komponen lebih lemah dibandingkan dengan interaksi antar molekul dalam tiap komponen murni merupakan campuran non-ideal yang menyimpang terhadap hukum Raoult secara positif. Sebaliknya, campuran yang memiliki gaya tarik dari interaksi antara molekul individual kedua komponen lebih kuat dibandingkan dengan interaksi antara molekul dalam tiap komponen murni merupakan campuran non-ideal yang menyimpang terhadap hukum Raoult secara negatif (Schaschke, 2014).

Larutan yang mengikuti Hukum Raoult akan menghasilkan hubungan fraksi mol dan tekanan sebagai garis lurus. Hal ini menunjukkan bahwa larutan yang ideal memiliki tekanan uap campuran yang besarnya berada di antara tekanan uap murni masing-masing komponen. Sedangkan berdasarkan hasil eksperimen pada sistem tert-butanol (1) + DEC (2), tekanan uap campuran disetiap variabel suhu memiliki tekanan uap yang lebih besar dibandingkan tekanan uap idealnya. Hal yang sama juga diperoleh pada sistem 2-butanol (1) + DEC (2) di setiap variabel suhu. Dapat dilihat dari Gambar 4.5 dan Gambar 4.7, kedua sistem menunjukkan nilai tekanan, baik tekanan eksperimen maupun tekanan korelasi, terletak di atas garis lurus solid yang mewakili data tekanan berdasarkan hukum Raoult. Berdasarkan hal tersebut, kedua sistem menunjukkan penyimpangan terhadap kondisi idealnya. Hubungan Tekanan dan Suhu, sebagaimana ditunjukkan grafik  $P$ - $T$  pada kedua sistem juga menunjukkan penyimpangan terhadap hukum Raoult. Oleh karena itu, Sistem tert-butanol (1) + DEC (2) dan 2-butanol (1) + DEC (2) yang menunjukkan penyimpangan yang lebih besar dibandingkan tekanan campuran idealnya, termasuk dalam sistem yang memiliki deviasi positif terhadap Hukum Raoult dan merupakan campuran non-ideal yang

memiliki gaya tarik dari interaksi antar molekul individual kedua komponen lebih lemah dibandingkan dengan interaksi antar molekul dalam tiap komponen murni. Karena lemahnya interaksi molekul antar komponen maka energi yang dibutuhkan lebih besar dibandingkan energi yang dilepas ketika larutan dicampurkan sehingga menghasilkan tekanan sistem campuran yang lebih besar dibandingkan dengan kondisi idealnya. (Zumdahl dan Zumdahl, 2014).

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **BAB V**

### **KESIMPULAN**

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa:

1. Telah berhasil didapatkan data kesetimbangan uap cair yang akurat untuk sistem biner 2-butanol (1) + DEC (2) dan tert-butanol (1) + DEC (2) pada suhu 303.15 – 323.15 K. Data eksperimen telah dikorelasikan dengan model Wilson, NRTL, dan UNIQUAC dengan AAD sebesar 1.3% untuk semua model pada sistem tert-butanol (1) + DEC (2) dan 1.5% untuk model Wilson dan UNIQUAC serta 1.4% untuk model NRTL pada sistem 2-butanol (1) + DEC (2)
2. Semua sistem yang diteliti menunjukkan deviasi positif terhadap hukum Raoult dan adanya azeotrop pada sistem 2-butanol + DEC setiap variabel suhu 303.15 K, 308.15 K, 313.15 K, 318.15 K dan 323.15 K.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR PUSTAKA

- Abrams, D.S.; Prausnitz, J. M. Statistical thermodynamic of liquid mixture: a new expression for the excess gibbs energy of partly or completely miscible system. *AIChE J.* **1975**, *21*, 116–28.
- Alternative Fuels Data Center U.S. Department of Energy. Ethanol Fuel Basics. **2015**.
- Arora, J. S. *Introduction to Optimum Design*, 3rd ed.; Academic Press: USA, **2012**, 567-569.
- Atsumi, Shota; Hanai, T.; Liao, J. C. Non-fermentative pathways for synthesis of branched-chain higher alcohols as biofuels. *Nature*. **2008**, *451*, 86-90.
- Crandall, J.W.; Deitzler, J. E.; Kapicak, L. A.; Poppelsdorf, F. US Patent 4663477. **1987**.
- Direktorat Sumber Daya Energi, Mineral dan Pertambangan. Policy Paper Keselarasan Kebijakan Energi Nasional (KEN) dengan Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) dan Rencana Umum Energi Daerah (RUED); Laporan Akhir: BAPPENAS, **2012**. 17-18.
- Dunn, B. C.; Guenneau, C.; Hilton, S. A.; Pahnke, J.; Eyring, E. M.; Dworzanski, J. Production of Diethyl Carbonate from Ethanol and Carbon Monoxide over a Heterogeneous Catalyst. *Energ Fuel*. **2002**, *16*(1):177.
- Eyring, E. M.; Meuzelaar, H. L. C.; Pugmire, R. J. Synthesis and Testing of Diethyl Carbonate as a Possible Diesel Fuel Additive. University of Utah: Salt Lake City. **2000**.
- Kirk – Othmer. *Encyclopedia of Chemical Technology*. New York: John Wiley & Sons Inc. 1984.
- Larsen, U.; Johansen, T.; Schramm, J. Ethanol as a Fuel for Road Transportation. *IEA AMF*. **2009**.
- Luo, H.; Xiao, W.; Zhu, K. Isobaric Vapor-Liquid Equilibria of Alkyl Carbonate with Alcohols. *Fluid Phase Equilibr.* **2000**, *175*, 91-105.

- Lyon, J. M.; Delaney, S. S. Potential Evaporative Emission Impacts Associated with the Introduction of Ethanol-Gasoline Blends in California. Sierra research Inc. California. **2000**.
- Mariadi, P. D.; Kurniawan, I. The Effect of n-Butanol Addition on Research Octane Number and Water Content of Gasohol. **2014**.
- Moxey, B. G.; Cairns, A.; Zhao, H. **2016**. 'A Comparison of Butanol and Ethanol Flame Development in an Optical Spark Ignition Engine'. *Fuel*. No. 170, pp. 27-38.
- Muskat, I.E.; Strain, F. US Patent 2379250. 1941.
- NCBI – National Centre for Biotechnological Information. 2-butanol. **2005**, CID No: 6568
- NCBI – National Centre for Biotechnological Information. tert-butanol. **2005**, CID No: 6386
- Ndaba, B.; Chiyanzu, I.; Marx, S. n-Butanol derived from biochemical and chemical routes: A review. *Biotechnology Reports*. **2015**, 8, 1-9.
- Novera, C. C.; Salam, M. R. Pengukuran Kesetimbangan Uap-Cair Isothermal Sistem Biner Etanol + dietil Karbonat dan 2-propanol + dietil karbonat pada 303.15 – 323.15 K [Skripsi]. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember; **2015**.
- Oktavian, R.; Amidelsi, V.; Rasmito, A.; Wibawa, G. Vapor Pressure Measurements of Ethanol – Isooctane and 1-Butanol – Isooctane System Using a New Ebulliometer. *Fuel*. **2013**, 107, 47-51.
- Pacheco, M. A.; Marshall, C. L. Review of Dimethyl Carbonate (DMC) Manufacture and Its Characteristics as a Fuel Additive. *Energy Fuels*. **1997**, 11, 2-29.
- Perry, R. H.; Green D. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 6th ed.; Mc Graw-Hill: USA, **1984**.
- Poling, B. E.; Prausnitz, J. M.; O'Connell, J.P. **2001**. *The Properties of Gases and Liquids, 5th Ed*. Mc-Graw Hill: New York.

- Pratiwi, A. A.; Prasetya, G. P. Pengukuran Kesetimbangan Uap-Cair Isothermal Sistem Biner 1-butanol + dietil Karbonat dan isobutanol + dietil karbonat pada 303.15 – 323.15 K [Skripsi]. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember; **2016**.
- Renon, H.; Prausnitz, J. M. Local compositions in thermodynamic excess functions for liquid mixtures. *AIChE J.* **1968**, *14*, 135–44.
- Rodríguez, A.; Canosa, J.; Domínguez, A.; Tojo, J. Isobaric Phase Equilibria of Diethyl Carbonate with Five Alcohols at 101.3 kPa. *J. Chem. Eng. Data.* **2003**, *48*, 86-91.
- Roh, N.S.; Dunn, B.C.; Eyring, E.M.; Dworzanski, J.; Meuzelaar, H. L. C.; Hu, J.Z. *ACS Division of Fuel Chemistry. Preprints*, **2002**, 47(1):142.
- Ryu, J. Yong. *Process for Making Dialkyl Carbonates*. US Patent 5,902,984. **1999**.
- Schaschke, C. *Oxford Dictionary of Chemical Engineering*. Oxford University Press: United Kingdom. **2014**.
- Semar, D.; Yuliarita, E. Meramu Bensin Ramah Lingkungan dengan Pemanfaatan Butanol. **2011**.
- Short, G. D. *Fuel Composition*; assigned to ICI. **1983**, EP Patent 98,691.
- Singh, S. B.; Dhar, A.; Agarwal, A.K. Technical Feasibility Study of Butanol-Gasoline Blends for Powering Medium-Duty Transportation Spark Ignition Engine. *Renewable Energy.* **2015**, *76*, 706-716.
- Smith, J. M.; Van Ness, H. C.; Abbott, M. M. *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics*, 6th ed.; McGraw-Hill: New York, **2001**.
- Tomishige, K.; Sakaihorii, T.; Ikeda, Y.; Fujimoto, K. A Novel Method of Direct Synthesis of Dimethyl Carbonate from Methanol and Carbon Dioxide Catalyzed by Zirconia. *Catal Lett.* **1999**, *58*(4):225.
- Urano, Y.; Kirishiki, M.; Onda, Y.; Tsuneki, H. US Patent 5430170. **1993**.



- Varol Y.; Öner, C.; Öztop, H. F.; Altun, S. Comparison of Methanol, Ethanol, or n-Butanol Blending with Unleaded Gasoline on Exhaust Emissions of an SI Engine. Taylor & Francis. **2014**.
- Wallner, T.; Miers, S. A.; McConnell, S. **2009**. 'A comparison of Ethanol and Butanol as Oxygenates Using a Direct-Injection, Spark-Ignition Engine'. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. Vol. 131/032802, pp 1-9.
- Wibawa, G.; Mustain, A.; Akbarina, M.; Ruslim, R. Isothermal Vapor-Liquid Equilibrium of Ethanol + Glycerol and 2-Propanol + Glycerol at Different Temperatures. *J. Chem. Eng. Data*. **2015**, 60, 955-959.
- Wijaya, S. A. Efek Katalisator (MPG-CAPS) terhadap Daya Torsi Mesin Sepeda Motor 4 Langkah. Universitas Diponegoro: Semarang. **2012**.
- Wilson, G. M. Vapor-liquid equilibrium. XI. A New Expression for The Excess Free Energy of Mixing. *J Am Chem Soc*. **1964**, 86, 127-30.
- Xu, Wei.; Vogel, S. R. US Patent EP2449064 A1. **2012**.
- Yusron, Z. Efek Penggantian Bahan Bakar Bensin dengan Minyak Tanah pada Pompa Air terhadap Volume Air & Konsumsi Bahan Bakar. Akademi Teknologi Otomotif Nasional Yogyakarta: Sleman. **2005**.
- Zhang, Z.; Ma, X.; Zhang, J.; He, F.; Wang, S. *J Mol Catal A*. **2005**, 227:141.
- Zumdahl, S. S.; Zumdahl, S. A. Chemistry an Atoms First Approach; Cengage Learning: USA. **2014**.

## DAFTAR NOTASI

$A$	Konstanta untuk Persamaan Antoine
$a$	Konstanta untuk Persamaan Wagner
$B$	Konstanta untuk Persamaan Antoine
$b$	Konstanta untuk Persamaan Wagner
$b_{ij}$	Parameter untuk Persa Model NRTL
$C$	Konstanta untuk Persamaan Antoine
$c$	Konstanta untuk Persamaan Wagner
$d$	Konstanta untuk Persamaan Wagner
$\hat{f}$	Fugasitas
$G$	Energi bebas Gibbs
$G_{ij}$	Konstanta empiris untuk Model NRTL
$\Delta h$	Beda ketinggian manometer Hg, mmHg
$n$	Jumlah mol total, mol
$P / P_{vp}$	Tekanan uap, kPa
$q_i$	Parameter Area untuk Komponen $i$
$r_i$	Parameter Volume untuk Komponen $i$
$R$	Konstanta Gas, 8.314 m <sup>3</sup> Pa/(mol. K)
$T$	Suhu, K
$t$	Suhu, °C
$\Delta u_{ij}$	Parameter untuk Model UNIQUAC
$x$	Fraksi mol di fase liquid saat setimbang
$x_i$	Fraksi mol fase liquid komponen $i$
$x^0$	Komposisi feed
$y$	Fraksi mol di fase uap
$\delta$	Ketidakpastian

**Greek**

$\alpha$	Parameter NRTL model (Non-Randomness factor)
$\phi_i$	Koefisien fugasitas komponen $i$
$\hat{\phi}_i$	Koefisien fugasitas komponen murni $i$
$\gamma_i$	Koefisien aktifitas komponen $i$
$\Lambda_{ij}$	Parameter untuk Persamaan Wilson
$\theta_i$	Fraksi Area untuk Komponen $i$
$\Phi_i$	Fraksi Volume untuk Komponen $i$
$\tau$	$1 - T/T_c$
$\tau_{ij}$	Konstanta empiris persamaan NRTL
$\rho$	Densitas, kg/m <sup>3</sup>

### Superscript

$l$	Fase liquid
$v$	Fase uap
$0$	murni ( $P_1^0$ = tekanan uap komponen 1 murni)

### Subscript

$c$	kondisi kritis
$cal$	Nilai dari perhitungan
$exp$	Nilai dari eksperimen
$i, j, k$	Komponen ke-
$Sat$	saturated/ jenuh
$1,2$	Komponen 1,2

## APPENDIKS

### 1. Validasi Alat dengan Pengukuran Tekanan Uap Murni

#### 1.1 Validasi Tekanan Uap Murni 2-butanol

Validasi tekanan uap murni 2-butanol menggunakan Persamaan Wagner sebagai berikut,

$$\ln P_{vpr}(kPa) = \frac{a\tau + b\tau^{1.5} + c\tau^{2.5} + d\tau^5}{T_r} T_r$$

$$T_r = \frac{T}{T_c}$$

$$\tau = 1 - T_r$$

dimana P dalam kPa dan T dalam K

Konstanta Persamaan Wagner untuk 2-butanol dan tert-butanol (Poling, Prausnitz dan O'connell, 2001) diberikan pada tabel dibawah ini :

Komponen	a	b	c	d	T <sub>c</sub> (K)	P <sub>c</sub> (kPa)
2-butanol	-8.0982	1.64406	-7.49	-5.27355	536.01	4198
Tert-butanol	-8.47927	2.47845	-9.27918	-2.53992	506.2	3973

Contoh perhitungan tekanan uap murni 2-butanol pada 30°C (303.15 K):

$$T_r = \frac{303.15}{536.01} = 0.5656$$

$$\tau = 1 - 0.5656 = 0.4344$$

$$\ln P_{vpr}(kPa) = \frac{a\tau + b\tau^{1.5} + c\tau^{2.5} + d\tau^5}{T_r}$$

$$P_{vp} (kPa) = \exp \left[ \frac{a\tau + b\tau^{1.5} + c\tau^{2.5} + d\tau^5}{T_r} \times \ln P_c \right]$$

$$P_{vp} (kPa) = \exp \left[ \frac{-8.0982 \times 0.4344 + 1.64406 \times 0.4344^{1.5} + -7.49 \times 0.4344^{2.5} + -5.27355 \times 0.4344^5}{0.5656} \times \ln(4198) \right]$$

$$P_{vp} = 3.20 kPa$$

Berdasarkan hasil eksperimen diperoleh tekanan uap murni 2-butanol pada 30°C (303.15 K) sebesar 3.22 kPa. Sehingga didapatkan nilai AAD tekanan uap murni 2-butanol berdasarkan eksperimen dan perhitungan sebesar,

$$AD = \left| \frac{3.22 - 3.20}{3.20} \right| \times 100\% = 0.66\%$$

## 1.2 Validasi Tekanan Uap Murni tert-butanol

Validasi tekanan uap murni tert-butanol menggunakan Persamaan Wagner seperti pada perhitungan uap murni 2-butanol.

Contoh perhitungan tekanan uap murni tert-butanol pada 30°C (303.15 K):

$$T_r = \frac{303.15}{506.2} = 0.5989$$

$$\tau = 1 - 0.5989 = 0.4011$$

$$\ln P_{vpr} (kPa) = \frac{a\tau + b\tau^{1.5} + c\tau^{2.5} + d\tau^5}{T_r}$$

$$P_{vp} (kPa) = \exp \left[ \frac{a\tau + b\tau^{1.5} + c\tau^{2.5} + d\tau^5}{T_r} x \ln P_c \right]$$

$$P_{vp} (kPa) =$$

$$\exp \left[ \frac{-8.47927x0.4011 + 2.47845x0.4011^{1.5} + -9.28x0.4011^{2.5} + -2.53992x0.4011^5}{0.5989} x \ln(3973) \right]$$

$$P_{vp} = 7.66 kPa$$

Berdasarkan hasil eksperimen diperoleh tekanan uap murni tert-butanol pada 30°C (303.15 K) sebesar 7.64 kPa. Sehingga didapatkan nilai AAD tekanan uap murni tert-butanol berdasarkan eksperimen dan perhitungan sebesar,

$$AD = \left| \frac{7.64 - 7.66}{7.66} \right| \times 100\% = 0.28\%$$

### 1.3 Validasi Tekanan Uap Murni DEC

Validasi tekanan uap murni isobutanol menggunakan Persamaan Antoine sebagai berikut,

$$\log_{10} P_{vp} = A - \frac{B}{T(K) + C}$$

dimana P dalam kPa dan T dalam K

Konstanta Persamaan Antoine untuk DEC (Luo *et. al.*, 2000) diberikan pada tabel dibawah ini :

A	B	C
5.883	1223.77	-84.304

Contoh perhitungan tekanan uap murni DEC pada 30°C (303.15 K):

$$\log_{10} P_{vp} = 5.883 - \frac{1223.77}{303.15 + (-84.304)}$$

$$\log_{10} P_{vp} = 0.291076913$$

$$P_{vp} = 10^{0.291076913}$$

$$P_{vp} = 1.95 \text{ kPa}$$

Berdasarkan hasil eksperimen diperoleh tekanan uap murni DEC pada 30°C (303.15 K) sebesar 1.9876 kPa. Sehingga didapatkan nilai AAD tekanan uap murni DEC berdasarkan eksperimen dan perhitungan sebesar,

$$AD = \left| \frac{1.96 - 1.95}{1.95} \right| \times 100\% = 0.27\%$$

## 2. Perhitungan Fraksi Mol Campuran

Contoh perhitungan fraksi mol campuran 2-butanol(1) + DEC(2) dengan BM sebesar 74.12 g/mol untuk 2-butanol dan 118.13 g/mol untuk DEC:

Massa 2-butanol = 79.2 gram

Massa DEC = 126.022 gram

$$\text{Mol}_{2\text{-butanol}} = \frac{126.022 \text{ g}}{118.13 \text{ g/mol}} = 1.0668 \text{ mol}$$

$$\text{Mol}_{\text{DEC}} = \frac{79.2 \text{ g}}{74.12 \text{ g/mol}} = 1.0685 \text{ mol}$$

$$X_1 = \frac{1.0685}{1.0685 + 1.0668} = 0.5004$$

$$X_2 = 1 - X_1 = 0.4996$$

### 3. Korelasi Data Eksperimen dengan menggunakan Persamaan Wilson

Persamaan Wilson yang digunakan untuk menghitung parameter biner adalah sebagai berikut,

$$\ln \gamma_1 = -\ln(x_1 + x_2\Lambda_{12}) + x_2 \left[ \frac{\Lambda_{12}}{x_1 + x_2\Lambda_{12}} - \frac{\Lambda_{21}}{x_2 + x_1\Lambda_{21}} \right]$$

$$\ln \gamma_2 = -\ln(x_2 + x_1\Lambda_{21}) - x_1 \left[ \frac{\Lambda_{12}}{x_1 + x_2\Lambda_{12}} - \frac{\Lambda_{21}}{x_2 + x_1\Lambda_{21}} \right]$$

$$\Lambda_{ij} = \frac{V_j}{V_i} \exp \frac{-a_{ij}}{RT}; (i \neq j)$$

Parameter  $a_{12}$  dan  $a_{21}$  didapatkan dengan meminimalkan nilai *average absolute deviation* (AAD) antara nilai eksperimen dan perhitungan menggunakan solver, dimana persamaan AAD adalah sebagai berikut:

$$AAD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{P_{cal} - P_{exp}}{P_{exp}} \times 100\% \right|$$

Dimana  $P_{exp}$  adalah tekanan uap yang dipoleh dari eksperimen sedangkan  $P_{cal}$  adalah tekanan uap yang diperoleh berdasarkan perhitungan dengan persamaan Wilson.

Berikut merupakan contoh perhitungan sistem biner tert-butanol (1) + DEC (2) pada  $x_1 = 0.3008$  dan  $x_2 = 0.6992$  pada suhu 30°C (303.15 K) dengan parameter  $a_{12}$  dan  $a_{21}$  yang telah diperoleh dari tahap optimasi dengan menggunakan solver.



Komponen	Tc (K)	Vc	Zc	Tr = T/Tc
tert-butanol (1)	506.2	275	0.26	303.15/506.2 = 0.5989
DEC (2)	576	356	0.249	313.15/576 = 0.5263

$$V = V_c \times Z^{1-Tr}$$

$$V_1 = 275 \times 0.26^{1-0.5989}$$

$$V_2 = 356 \times 0.249^{1-0.5263}$$

$$V_1 = 97.43 \text{ cm}^3/\text{mol}$$

$$V_2 = 115.80 \text{ cm}^3/\text{mol}$$

Diketahui:

$$R = 8.314 \text{ m}^3 \text{ Pa/mol K}; \quad a_{12} = 1295 \text{ m}^3 \text{ Pa/mol};$$

$$P_1^{sat} = 7.94 \text{ kPa}; \quad P_2^{sat} = 1.96 \text{ kPa}; \quad a_{21} = 1384 \text{ m}^3 \text{ Pa/mol};$$

$$\Lambda_{12} = \frac{V_j}{V_i} \exp \frac{-a_{ij}}{RT} = \frac{115.80}{97.43} \exp \frac{-(1295)}{8.314 \times 303.15} = 0.71$$

dan

$$\Lambda_{21} = \frac{V_i}{V_j} \exp \frac{-a_{ji}}{RT} = \frac{97.43}{115.43} \exp \frac{-1384}{8.314 \times 303.15} = 0.49$$

Berdasarkan Persamaan Wilson (2.18) dan (2.19),

$$\ln \gamma_1 = [-\ln\{0.3 + (0.7 \times 0.71)\}] + 0.7 \times \left[ \left\{ \frac{0.71}{0.3 + (0.7 \times 0.71)} \right\} - \left\{ \frac{0.49}{0.7 + (0.3 \times 0.49)} \right\} \right]$$

$$\gamma_1 = 1.563$$

dan,

$$\ln \gamma_2 = [-\ln\{0.7 + (0.3 \times 0.49)\}] - 0.3 \times \left[ \left\{ \frac{0.71}{0.3 + (0.7 \times 0.71)} \right\} - \left\{ \frac{0.49}{0.7 + (0.3 \times 0.49)} \right\} \right]$$

$$\gamma_2 = 1.076$$

Maka,

$$P_{cal} = \sum x_i \gamma_i P_i^{sat}$$

$$P_{cal} = (0.3 \times 1.563 \times 7.94) + (0.7 \times 1.076 \times 1.96)$$

$$= 5.21 \text{ kPa}$$

Berdasarkan hasil eksperimen diperoleh tekanan uap campuran tert-butanol (1) + DEC (2) pada 30°C (303.15 K) sebesar 5.34 kPa. Sehingga didapatkan nilai AAD tekanan uap campuran diatas berdasarkan eksperimen dan perhitungan didapat,

$$AAD = \left| \frac{5.21 - 5.34}{5.34} \right| \times 100\% = 2.46\%$$

Berdasarkan data eksperimen dan perhitungan diperoleh AAD Persamaan Wilson terhadap eksperimen sebesar 2.46%

#### 4. Korelasi Data Eksperimen dengan menggunakan Persamaan NRTL

Persamaan NRTL yang digunakan untuk menghitung parameter biner adalah sebagai berikut,

$$\ln \gamma_1 = x_2^2 \left[ \tau_{12} \left( \frac{G_{21}}{x_1 + x_2 G_{21}} \right)^2 + \left( \frac{G_{12} \tau_{12}}{(x_2 + x_1 G_{12})^2} \right) \right]$$

$$, \ln \gamma_2 = x_1^2 \left[ \tau_{21} \left( \frac{G_{12}}{x_2 + x_1 G_{12}} \right)^2 + \left( \frac{G_{21} \tau_{21}}{(x_1 + x_2 G_{21})^2} \right) \right]$$

$$G_{21} = \exp(-\alpha \tau_{21}); \tau_{12} = \frac{b_{12}}{RT}; \tau_{21} = \frac{b_{21}}{RT}$$

Pada Persamaan NRTL ini, nilai parameter ketidakacakan ( $\alpha$ ), parameter  $b_{12}$  dan  $b_{21}$  diperoleh melalui trial and error serta optimasi dengan meminimalkan nilai OF menggunakan solver.

Berikut merupakan contoh perhitungan sistem biner tert-butanol(1)+dietil karbonat(2) pada  $x_1 = 0.3008$  dan  $x_2 = 0.6992$  pada suhu  $30^\circ\text{C}$  (303.15 K) dengan parameter  $b_{12}$  dan  $b_{21}$  yang telah diperoleh dari tahap optimasi dengan menggunakan solver.

$$b_{12} = 2120 \text{ cal/mol}; b_{21} = 442 \text{ cal/mol}; R = 8.314 \text{ m}^3 \text{ Pa mol}^{-1} \text{ K}^{-1}; \alpha = 0.3; P_1^{sat} = 7.94 \text{ kPa}; P_2^{sat} = 1.96 \text{ kPa}$$

$$\tau_{12} = \frac{b_{12}}{RT} = \frac{2120}{8.314 \times 303.15} = 0.84;$$

$$\tau_{21} = \frac{b_{21}}{RT} = \frac{442}{8.314 \times 303.15} = 0.18$$

$$G_{12} = \exp(-0.3 \times 0.84) = 0.78;$$

$$G_{21} = \exp(-0.3 \times 0.18) = 0.95$$

Berdasarkan Persamaan NRTL,

$$\ln \gamma_1 = 0.7^2 \left[ 0.84 \times \left( \frac{0.95}{0.3 + 0.7 \times 0.95} \right)^2 + \left( \frac{0.78 \times 0.84}{(0.7 + 0.3 \times 0.78)^2} \right) \right] \quad \gamma_1 = 1.57$$

$$\ln \gamma_2 = 0.3^2 \left[ 0.18 \left( \frac{0.78}{0.7 + 0.3 \times 0.78} \right)^2 + \left( \frac{0.95 \times 0.18}{(0.3 + 0.7 \times 0.95)^2} \right) \right] \quad \gamma_2 = 1.07$$

Maka,

$$P_{cal} = \sum x_i \gamma_i P_i^{sat}$$

$$P_{cal} = 0.3008 \times 1.57 \times 7.94 + 0.7 \times 1.07 \times 1.96$$

$$= 5.21 \text{ kPa}$$

Berdasarkan hasil eksperimen diperoleh tekanan uap campuran tert-butanol(1)+DEC(2) pada 30°C (303.15 K) sebesar 5.34 kPa. Sehingga didapatkan nilai AAD tekanan uap campuran diatas berdasarkan eksperimen dan perhitungan didapat,

$$AAD = \left| \frac{5.21 - 5.34}{5.34} \right| \times 100\% = 2.35\%$$

Berdasarkan data eksperimen dan perhitungan diperoleh AAD Persamaan NRTL terhadap eksperimen sebesar 2.35%

## 5. Korelasi Data Eksperimen dengan menggunakan Persamaan UNIQUAC

Persamaan UNIQUAC yang digunakan untuk menghitung parameter biner adalah sebagai berikut,

$$\ln \gamma_1 = \ln \frac{\varphi_1}{x_1} + \frac{z}{2} q_1 \ln \frac{\theta_1}{\varphi_1} + \varphi_2 \left( l_1 - \frac{r_1}{r_2} l_2 \right) - q_1 \ln(\theta_1 + \theta_2 \tau_{21}) + \theta_2 q_1 \left( \frac{\tau_{21}}{\theta_1 + \theta_2 \tau_{21}} - \frac{\tau_{12}}{\theta_2 + \theta_1 \tau_{12}} \right)$$

$$\ln \gamma_2 = \ln \frac{\varphi_2}{x_2} + \frac{z}{2} q_1 \ln \frac{\theta_2}{x_i r_i^{\varphi_2}} + \varphi_1 \left( l_2 - \frac{r_1}{r_2} l_1 \right) - q_2 \ln(\theta_2 + \theta_1 \tau_{12}) + \theta_1 q_2 \left( \frac{\tau_{12}}{\theta_2 + \theta_1 \tau_{12}} - \frac{\tau_{21}}{\theta_1 + \theta_2 \tau_{21}} \right)$$

$$\varphi_i = \frac{\sum_j x_j r_j}{\sum_j x_j r_j} ; \quad \theta_i = \frac{\sum_j x_j q_j}{\sum_j x_j q_j} ;$$

$$\tau_{ji} = \exp \left( - \frac{(u_{ji} - u_{jj})}{RT} \right) ;$$

$$\Delta u_{12} = u_{12} - u_{22}; \Delta u_{21} = u_{21} - u_{11}$$

dimana,  $u_{ji} \neq u_{ij}$  dan  $z = 10$

Pada Persamaan UNIQUAC ini, parameter  $\Delta u_{12}$  dan  $\Delta u_{21}$  diperoleh melalui trial and error serta optimasi dengan meminimalkan nilai OF menggunakan solver.

Berikut merupakan contoh perhitungan sistem biner tert-butanol(1)+dietil karbonat(2) pada  $x_1 = 0.3008$  dan  $x_2 = 0.6992$  pada suhu  $30^\circ\text{C}$  (303.15 K) dengan parameter  $\Delta u_{12}$  dan  $\Delta u_{21}$  yang telah diperoleh dari tahap optimasi dengan menggunakan solver.

$$\Delta u_{12} = 371.12 \text{ m}^3 \text{ Pa mol}^{-1}; \Delta u_{21} = 196.71 \text{ m}^3 \text{ Pa mol}^{-1};$$

$$R = 8.314 \text{ m}^3 \text{ Pa mol}^{-1} \text{ K}^{-1}; P_1^{sat} = 7.94 \text{ kPa}; P_2^{sat} = 1.96 \text{ kPa}$$

$$l_1 = z/2 \times (r_1 - q_1) - (r_1 - 1) = -2.03$$

$$l_2 = z/2 \times (r_2 - q_2) - (r_2 - 1) = -0.98$$

$$\varphi_1 = \frac{x_1 r_1}{x_1 r_1 + x_2 r_2} = \frac{0.3 \times 3.92}{(0.3 \times 3.92) + (0.7 \times 4.77)} = 0.26 \quad ; \varphi_2 = 0.74$$

$$\theta_1 = \frac{\frac{x_1 q_1}{x_1 q_1 + x_2 q_2}}{\frac{0.3 \times 3.74}{(0.3 \times 3.74) + (0.7 \times 4.22)}} = 0.28$$

$$\theta_2 = 0.72$$

$$\tau_{12} = \exp\left(-\frac{(\Delta u_{12})}{RT}\right) = \exp\left(-\frac{(371.12)}{8.314 \times 303.15}\right) = 0.86$$

$$\tau_{21} = 1.92$$

Berdasarkan Persamaan UNIQUAC,

$$\ln \gamma_1 = \ln \frac{\varphi_1}{x_1} + \frac{z}{2} q_1 \ln \frac{\theta_1}{\varphi_1} + \varphi_2 \left( l_1 - \frac{r_1}{r_2} l_2 \right) - q_1 \ln(\theta_1 + \theta_2 \tau_{21}) + \theta_2 q_1 \left( \frac{\tau_{21}}{\theta_1 + \theta_2 \tau_{21}} - \frac{\tau_{12}}{\theta_2 + \theta_1 \tau_{12}} \right)$$

$$\ln \gamma_1 = \ln \frac{0.26}{0.3} + \frac{10}{2} \times 3.74 \times \ln \frac{0.28}{0.26} + 0.74 \times \left( (-2.03) - \frac{3.92}{4.77} \times (-0.98) \right) -$$

$$3.74 \times \ln(0.28 + 0.72 \times 1.92) + 0.72 \times 3.74 \times \left( \frac{1.92}{0.28 + 0.72 \times 1.92} - \frac{0.86}{0.72 + 0.28 \times 0.86} \right)$$

$$\gamma_1 = 1.57$$

$$\text{dan, diperoleh } \gamma_2 = 1.07$$

$$\begin{aligned} \text{Maka,} \\ P_{cal} &= \sum x_i \gamma_i P_i^{sat} \\ P_{cal} &= 0.3008 \times 1.57 \times 7.94 + 0.6992 \times 1.07 \times 1.96 = 5.21 \text{ kPa} \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil eksperimen diperoleh tekanan uap campuran tert-butanol(1)+dietil karbonat(2) pada 30°C (303.15 K) sebesar 5.34 kPa. Sehingga didapatkan nilai AAD tekanan uap campuran diatas

$$AAD = \left| \frac{5.21 - 5.34}{5.34} \right| \times 100\% = 2.37\%$$

berdasarkan eksperimen dan perhitungan didapat,

Berdasarkan data eksperimen dan perhitungan diperoleh AAD Persamaan UNIQUAC terhadap eksperimen sebesar 2.37%

### 8. Perhitungan *fraksi vapor*

Untuk sistem tert-butanol-dietil karbonat dengan  $x_1=0.3008$ .

Tekanan sistem ( $P_{cal}$ ) = 5.21 kPa.  $P_1^{sat} = 7.94$  kPa;  $\gamma_1 = 1.56$

$$y_i = x_i \gamma_i P_i^{sat} / \sum x_i \gamma_i P_i^{sat}$$

$$y_i = x_i \gamma_i P_i^{sat} / P_{cal}$$

$$y_i = 0.3008 \times 1.56 \times 7.94 / 5.21$$

$$y_i = 0.72$$

### 9. Perhitungan titik azeotrope

Untuk mendapatkan komposisi  $x_1$  pada suatu titik azeotrop, digunakan persamaan sebagai berikut

$$y_i = x_i \gamma_i P_i^{sat} / P_{cal}$$

$$\frac{y_i}{x_i} = \frac{\gamma_i P_i^{sat}}{P_{cal}}$$

Dengan memasukkan nilai awal  $x_1$ , kemudian menghitung *relative volatility* ( $\alpha_{12}$ )

$$\alpha_{12} = \frac{y_1/x_1}{y_2/x_2}$$

dengan metode *trial and error*, nilai  $x_1$  pada titik azeotrop didapatkan saat  $\alpha_{12} = 1$ . Sebagai contoh, untuk menentukan titik azeotrop sistem 2-butanol+DEC pada suhu 303.15 K dengan model Wilson, digunakan nilai awal  $x_1 = 0.2$ ,  $P_1^{sat} = 2.43$  kPa. Berdasarkan perhitungan persamaan Wilson, didapatkan  $P_{cal} = 3.49$  kPa,  $\gamma_1 = 1.47$  dan  $y_1 = 0.205$ .

$$x_2 = 1 - x_1 = 0.8$$

$$y_2 = 1 - y_1 = 0.795$$

$$\alpha_{12} = \frac{0.205/0.2}{0.795/0.8} = 1.03$$

Dengan trial and error agar  $\alpha_{12} = 1$ , didapatkan  $x_1 = 0.2521$

## 10. Perhitungan *Uncertainty*

### *Uncertainty* Fraksi Mol

Perhitungan fraksi mol dari massa penimbangan 1-butanol dan dietil karbonat didapatkan dari persamaan:

$$x_1 = \frac{m_1 / BM_1}{m_1 / BM_1 + m_2 / BM_2}$$

Untuk  $x_1(m_1, m_2)$ , *uncertainty*  $x_1(\delta x_1)$  diperoleh dari penurunan parsial fungsi  $x_1$  terhadap  $m_1$  dan  $m_2$ .

$$\delta x_1 = \left| \frac{\partial x_1}{\partial m_1} \right| \delta m_1 + \left| \frac{\partial x_1}{\partial m_2} \right| \delta m_2$$

$$\delta x_1 = \left| \frac{(m_1 / BM_1 + m_2 / BM_2) / BM_1 - m_1 / BM_1^2}{(m_1 / BM_1 + m_2 / BM_2)^2} \right| \delta m_1 + \left| - \frac{m_1 / BM_1 BM_2}{(m_1 / BM_1 + m_2 / BM_2)^2} \right| \delta m_2$$

$$\delta x_1 = \frac{m_2 / BM_1 BM_2}{(m_1 / BM_1 + m_2 / BM_2)^2} \delta m_1 + \frac{m_1 / BM_1 BM_2}{(m_1 / BM_1 + m_2 / BM_2)^2} \delta m_2$$

$$\delta m_1 = \delta m_2 = \delta m$$



$$\delta x_1 = \frac{m_2 + m_1}{(m_1 / BM_1 + m_2 / BM_2)^2 (BM_1 BM_2)} \delta m$$

*Uncertainty* fraksi mol komponen 2 ( $\delta m_2$ ) diturunkan dari hubungan  $x_2$  dengan  $x_1$ .

$$x_2 = 1 - x_1$$

$$\delta x_2 = \delta(1 - x_1)$$

$$\delta x_2 = |-\delta x_1|$$

$$\delta x_2 = \delta x_1$$

Pada saat penimbangan massa tert-butanol fraksi 0.3, diketahui penimbangan  $m_1$  sebesar 45 g dan  $m_2$  sebesar 166.6765 g dengan keakuratan neraca analitik  $\delta m = 0.0001$  g

$$\delta x_1 = \frac{45 + 166.6765}{(45 / 74.12 + 166.6765 / 118.13)^2 (74.12 \times 118.13)} \times 0.0001$$

$$\delta x_1 = 5.93598 \times 10^{-7}$$

$$\frac{\delta x_2}{x_2} = \frac{5.93598 \times 10^{-7}}{0.6992} = 8.49 \times 10^{-5} \%$$

$$\frac{\delta x_1}{x_1} = \frac{5.93598 \times 10^{-7}}{0.3008} = 1.97 \times 10^{-4} \%$$

*Uncertainty* fraksi mol komponen 1 ( $\delta x_1$ ) terhadap fraksi mol komponen 1 diperoleh sebesar  $1.97 \times 10^{-4} \%$ . *Uncertainty* fraksi

mol komponen 2 ( $\delta x_2$ ) terhadap fraksi mol komponen 2 diperoleh sebesar  $8.49 \times 10^{-5}\%$

### 11. *Uncertainty Tekanan*

11. Tekanan sistem diperoleh dari selisih tekanan lingkungan dengan tekanan dari pembacaan pressure gage. Pada contoh perhitungan uncertainty faksi tert-butanol 0.1 dan suhu 303.15 K.

$$P_{sistem} = P_{lingkungan} + P_{Gage}$$

$$\delta P_{sistem} = \delta P_{lingkungan} + \delta P_{gage}$$

$\delta P_{lingkungan}$  adalah ketelitian alat ukur tekanan lingkungan yakni 0.01 kPa

$\delta P_{gage}$  adalah ketelitian alat ukur tekanan gage yakni 0.1 kPa

$$\delta P_{sistem} = 0.01 + 0.1 = 0.11 \text{ kPa (absolute uncertainty)}$$

$$\frac{\delta P_{sistem}}{P_{sistem}} = \frac{0.11}{3.62} = 3.04\%$$

$$\frac{\delta P_{sistem}}{P_{sistem}} = 3.04\% \quad (\text{relative uncertainty})$$

## BIODATA PENULIS



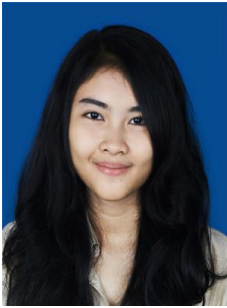
Andika Dwimasputra lahir pada tanggal 23 Mei 1995 di Lumajang, merupakan anak ke-2 dari 2 bersaudara. Penulis menempuh pendidikan formal di SDN Tempeh Tengah 01, kemudian menempuh pendidikan menengahnya di SMP Negeri 1 Tempeh dan SMA Negeri 2 Lumajang. Pada tahun 2013, penulis melanjutkan pendidikan tingginya di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Fakultas Teknologi Industri, Departemen

Teknik Kimia, sampai dengan terselesaikannya buku ini. Banyak pengalaman yang penulis peroleh semasa kuliah, diantaranya mengikuti Organisasi Islam Nurul 'ilmi sebagai bendahara dan menjadi ketua club badminton "PROTON".

Penulis menjalani *internship* di PT. Kaltim Methanol Industri, Bontang, Kaltim. Pada akhir studinya, penulis memilih Laboratorium Termodinamika Teknik Kimia untuk pengerjaan tugas akhir. Penulis menyelesaikan tugas Pra-Desain Prabik Pupuk Urea dari Batubara Kelas Rendah dan skripsi yang berjudul Pengukuran Keseimbangan Uap-Cair Sistem Biner Isothermal 2-Butanol+Dietil Karbonat dan Tert-butanol+Dietil Karbonat pada 303.15-323.15 K dibawah bimbingan Prof. Dr. Ir. Gede Wibawa, M.Eng dan Rizky Tetrisyanda, S.T., M.T. Apabila ada kritik dan saran tentang penelitian ini, pembaca dapat menghubungi penulis via email: [andikadwimas@gmail.com](mailto:andikadwimas@gmail.com)

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BIODATA PENULIS



Naomi Hurayah Aden lahir pada tanggal 19 November 1995 di Kota Surabaya, merupakan anak ke-3 dari 3 bersaudara. Penulis menempuh pendidikan formal di SDN Pacarkeling V/186 Surabaya, kemudian menempuh pendidikan menengahnya di SMP Negeri 6 Surabaya dan SMA Negeri 5 Surabaya. Pada tahun 2013, penulis melanjutkan pendidikan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Fakultas Teknologi Industri, Departemen Teknik Kimia, sampai dengan terselesaikannya buku ini. Banyak pengalaman yang penulis peroleh semasa kuliah, diantaranya 3 tahun berturut-turut lolos diterima sebagai penerima beasiswa Karya Salemba Empat, dan dari sini lah penulis mengikuti dan lolos interview dari donatur beasiswanya pada periode 2015/2016, yakni Indofood, sehingga menjadi bagian dari BISMA (Beasiswa Indofood Sukses Makmur) Batch 8 dan berkesempatan mengikuti rangkaian Indofood Leadership Camp. Selain itu, penulis tergabung dalam Kepanitiaan CHERNIVAL, organisasi Badan Eksekutif Mahasiswa Fakultas Teknologi Industri ITS, dan lain sebagainya.

Penulis menjalani *internship* di PT. Petrokimia Gresik. Pada akhir studinya, penulis memilih Laboratorium Termodinamika Teknik Kimia untuk pengerjaan tugas akhir. Penulis menyelesaikan tugas Pra-Desain Prabik Pupuk Urea dari Batubara Kelas Rendah dan skripsi yang berjudul Pengukuran Kesetimbangan Uap-Cair Sistem Biner Isothermal 2-Butanol+Diethyl Karbonat dan Tert-butanol+Diethyl Karbonat pada 303.15-323.15 K dibawah bimbingan Prof. Dr. Ir. Gede Wibawa, M.Eng dan Rizky Tetrisyanda, S.T., M.T. Apabila ada kritik dan saran tentang penelitian ini, pembaca dapat menghubungi penulis via email: [naomi\\_ha@gmail.com](mailto:naomi_ha@gmail.com)

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*